

DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS APLICADOS AO ESTUDO E OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE GRANDES ESTRUTURAS

António Araújo Correia

(com várias contribuições de outros colegas do LNEC)



Tópicos

- Comportamento dinâmico de barragens
- Observação e modelação de pontes e viadutos
- Ensaios híbridos em Engenharia Sísmica

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS

MODELOS MATEMÁTICOS

Os resultados experimentais são utilizados para avaliação do comportamento dinâmico das barragens e calibrar os modelos numéricos para diferentes níveis da ação dinâmica e condições estruturais

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

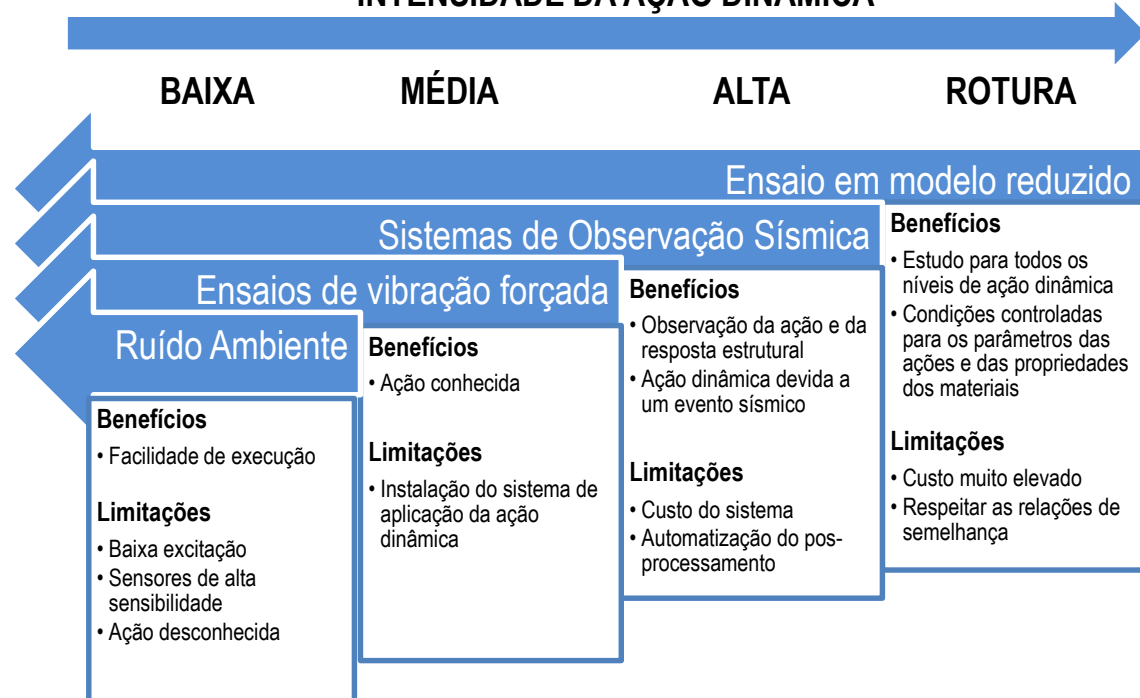
INTENSIDADE DA AÇÃO DINÂMICA

BAIXA

MÉDIA

ALTA

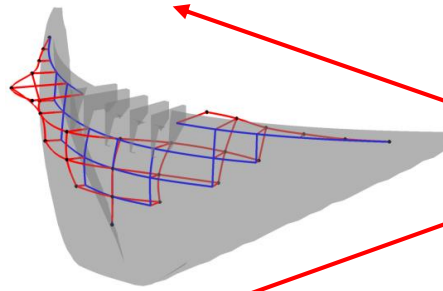
ROTURA



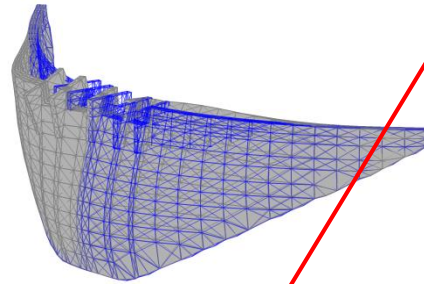
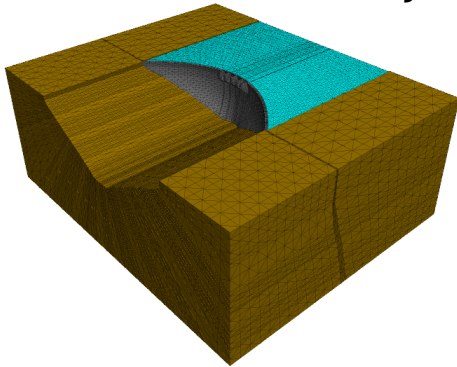
AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE BARRAGENS

Ensaio de vibração forçada



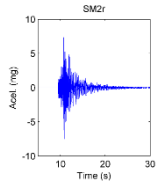
Modelação numérica



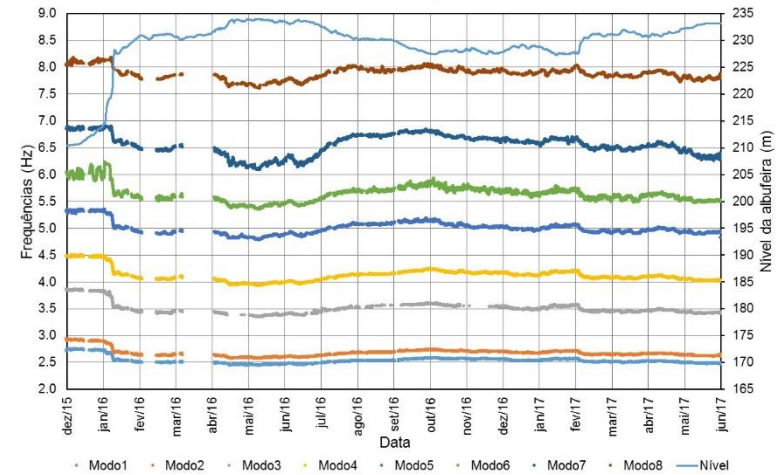
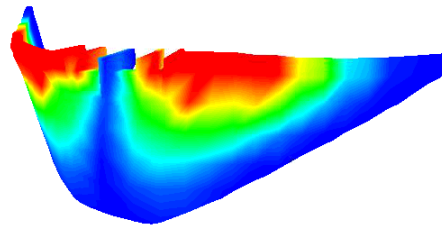
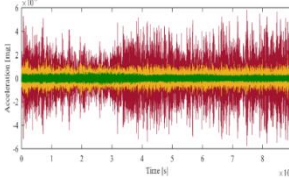
Acompanhamento do comportamento dinâmico para deteção automática de possíveis anomalias e danos

Monitorização do protótipo

Sismo

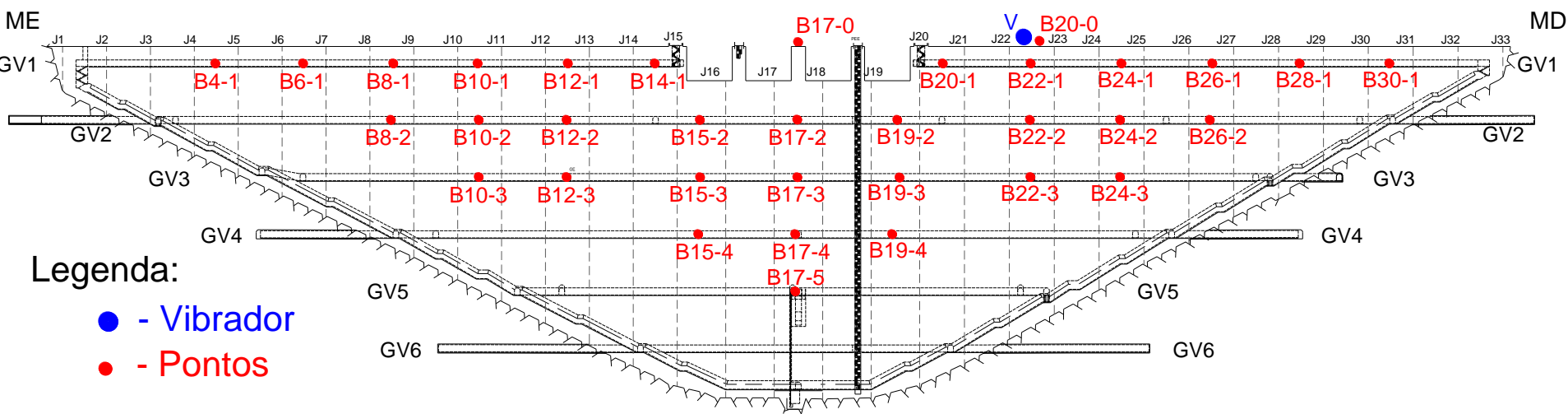


Monitorização em contínuo

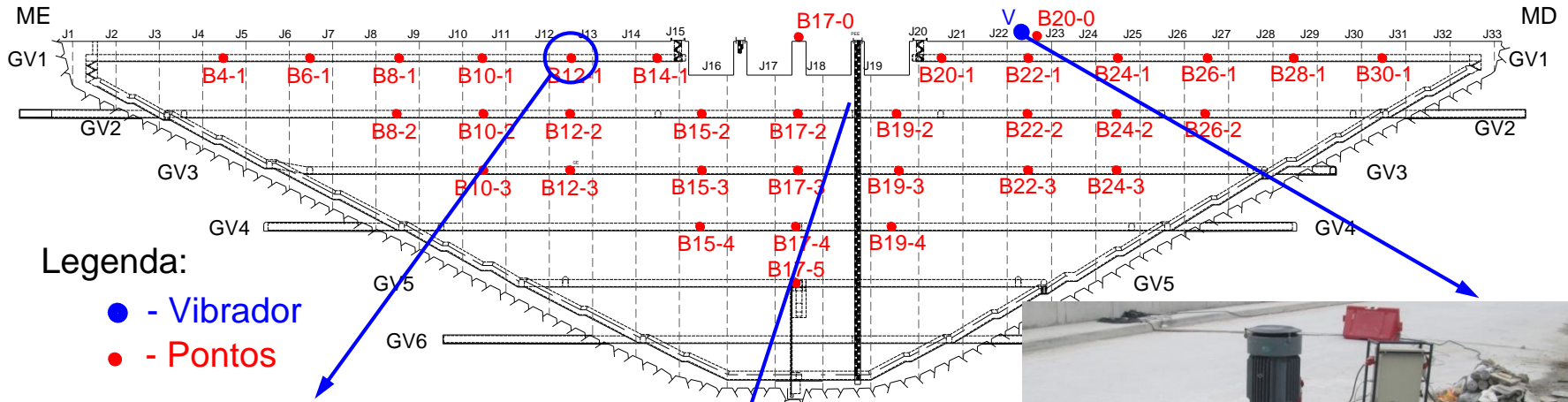


ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

- 1º ensaio para a situação de albufeira vazia
- 2º ensaio para a situação de albufeira cheia

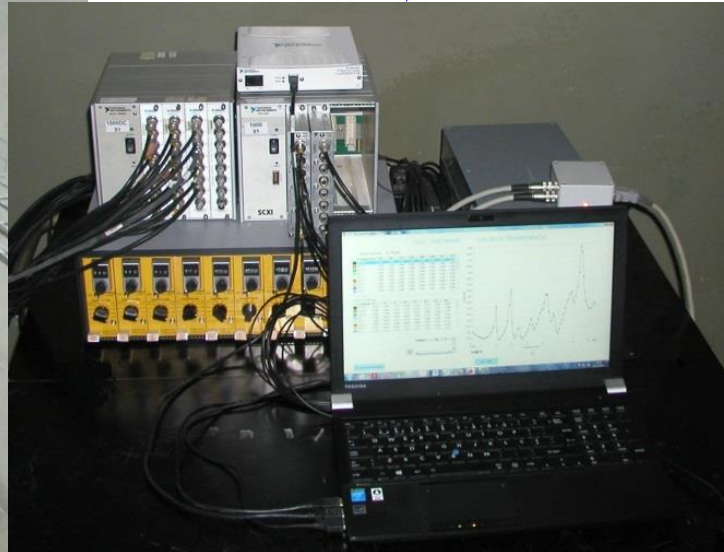


ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA



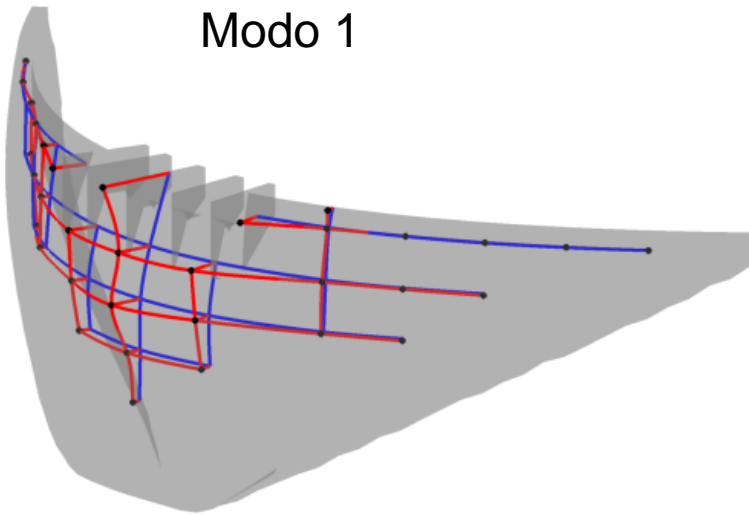
Legenda:

- - Vibrador
- - Pontos

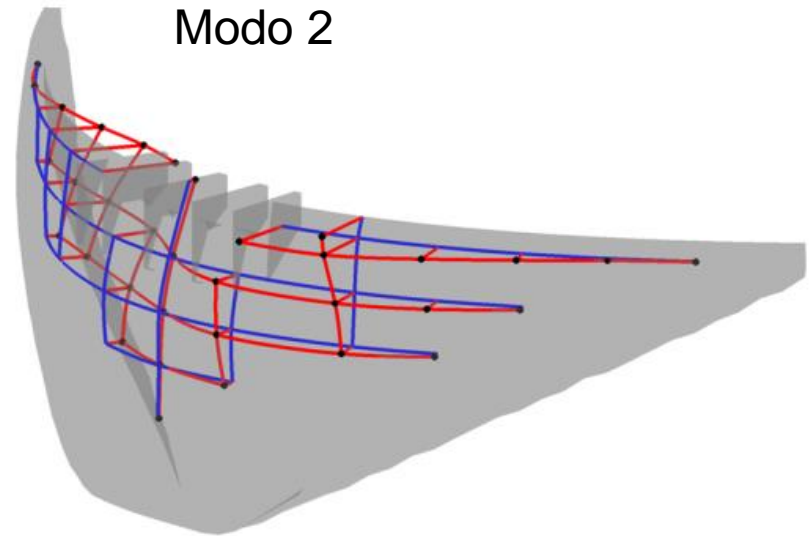


ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

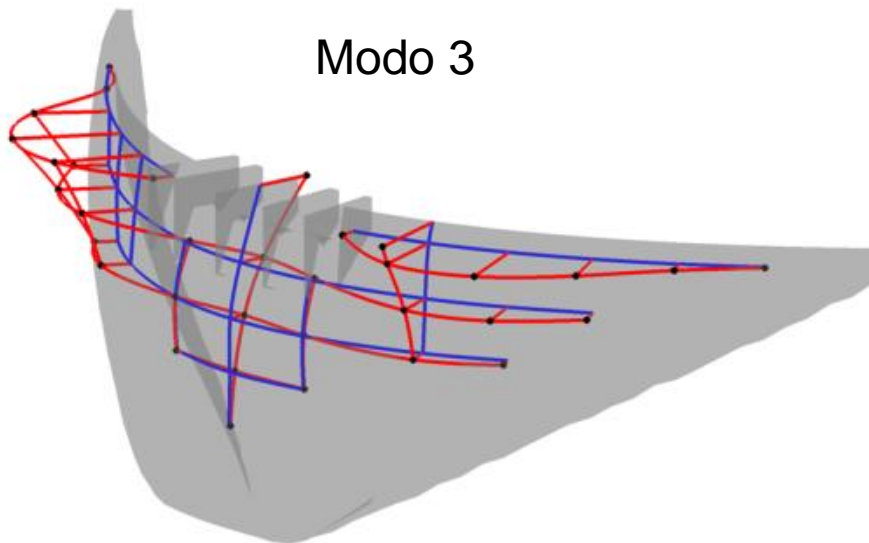
Modo 1



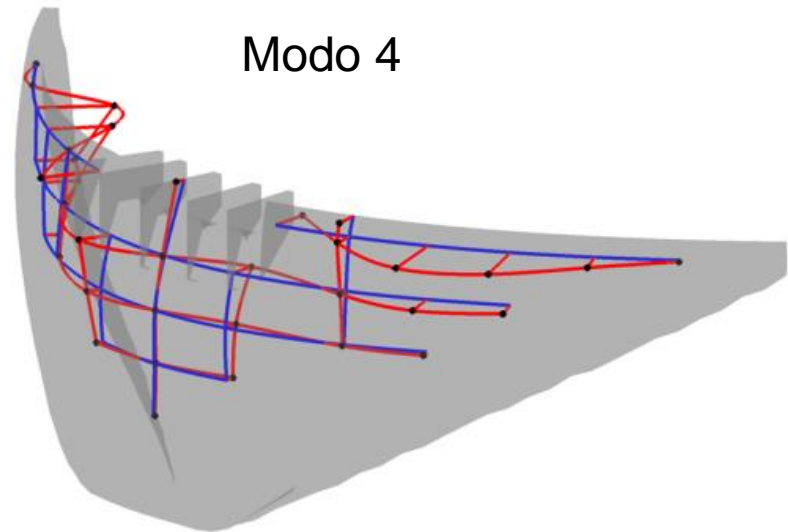
Modo 2



Modo 3

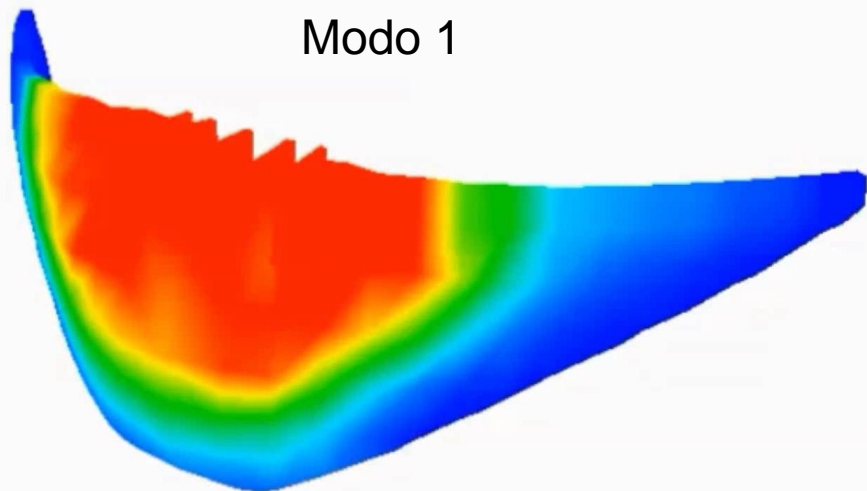


Modo 4

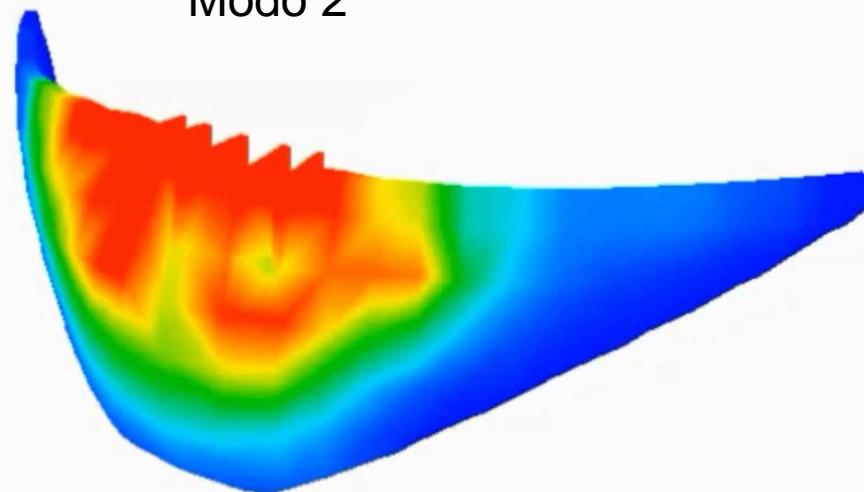


ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

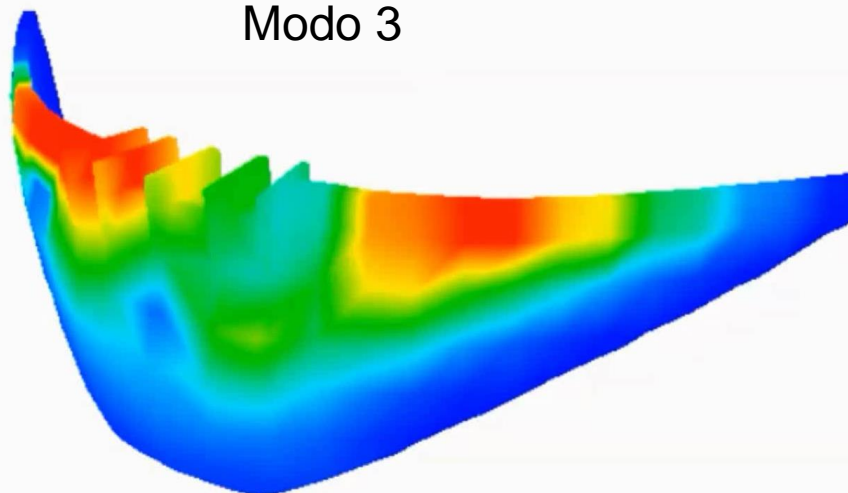
Modo 1



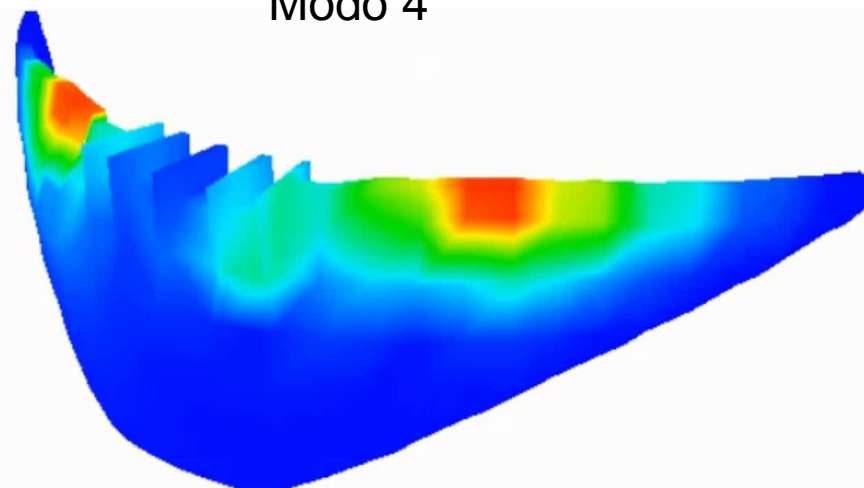
Modo 2



Modo 3

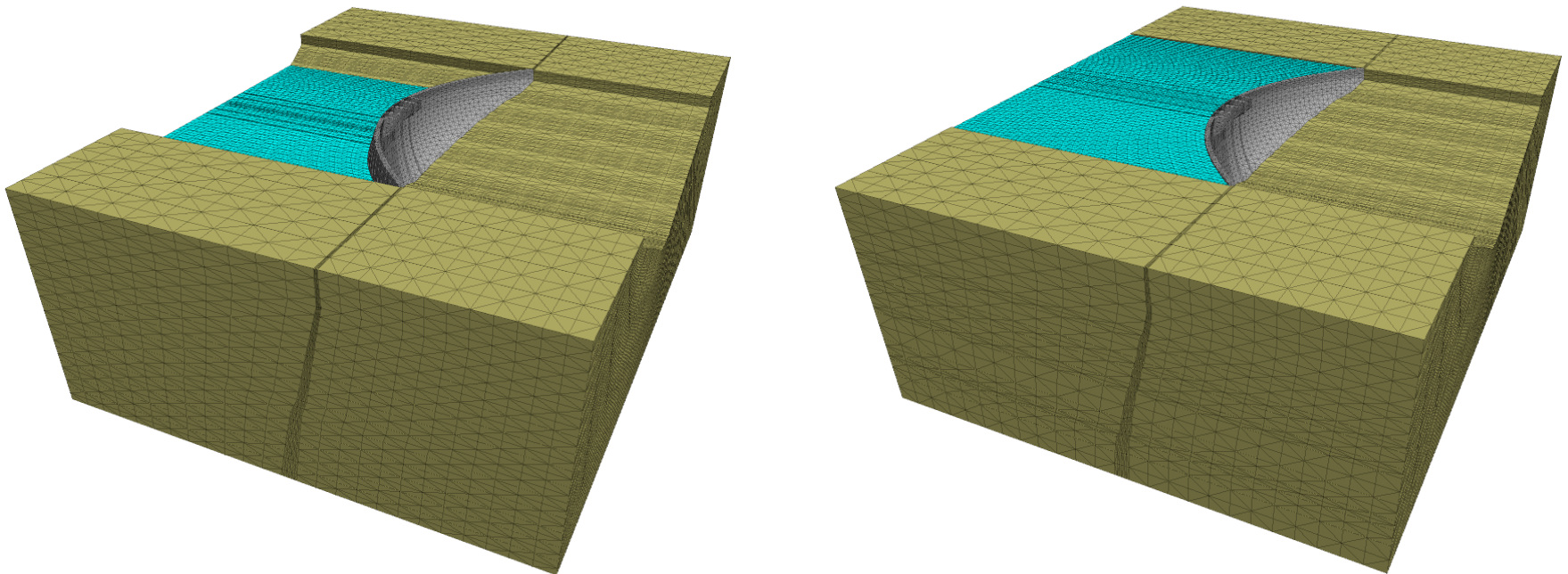


Modo 4



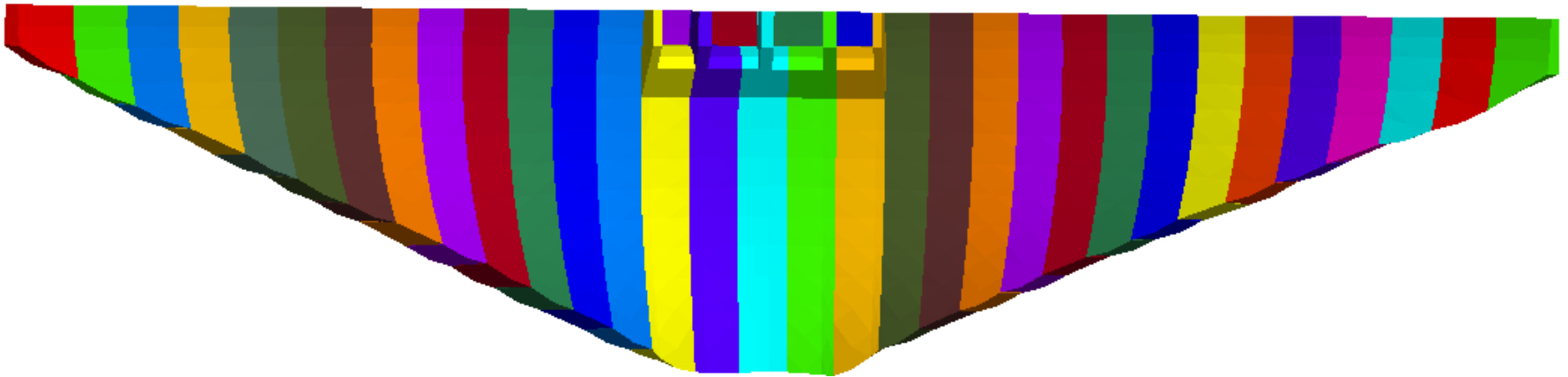
MODELAÇÃO NUMÉRICA

- Modelo descontínuo de elementos finitos com representação da barragem, albufeira e fundação (3DEC)



MODELAÇÃO NUMÉRICA

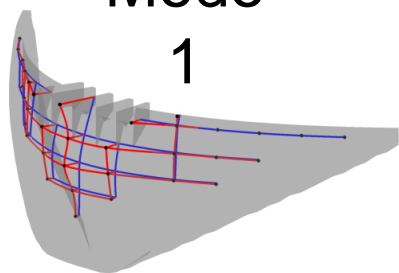
- Modelo descontínuo de elementos finitos com representação da barragem, albufeira e fundação (3DEC)
- Consideração das juntas de contração
- Modelos numéricos calibrados com os resultados dos ensaios de vibração forçada



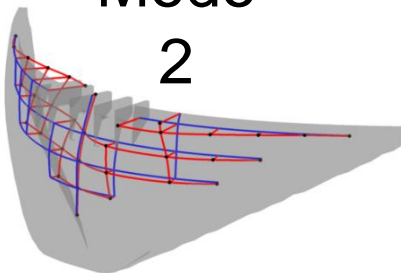
COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Configurações modais

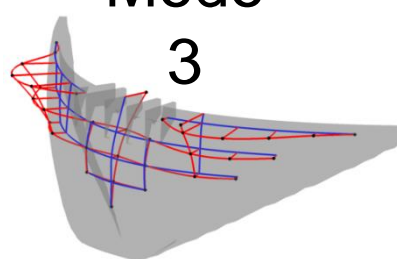
Modo
1



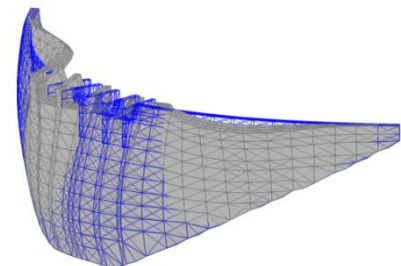
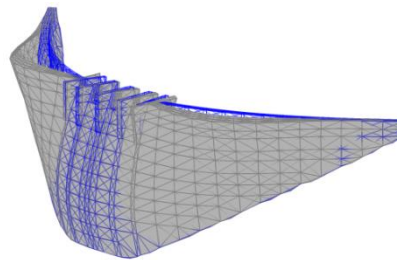
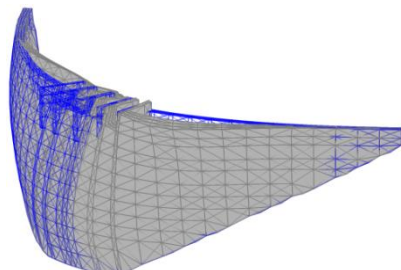
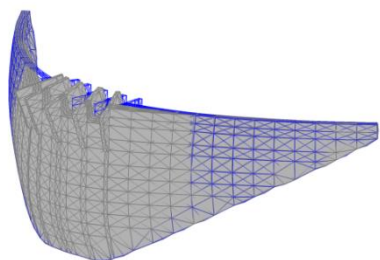
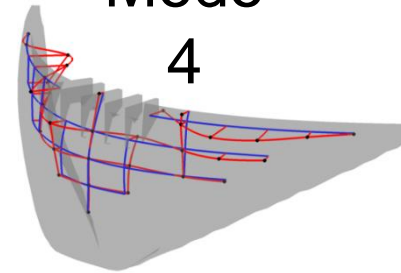
Modo
2



Modo
3



Modo
4



COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

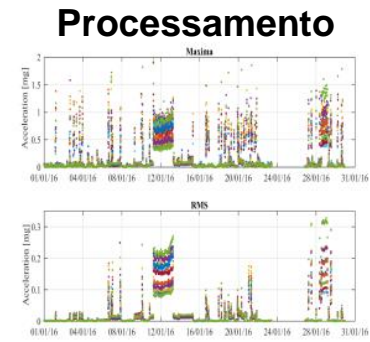
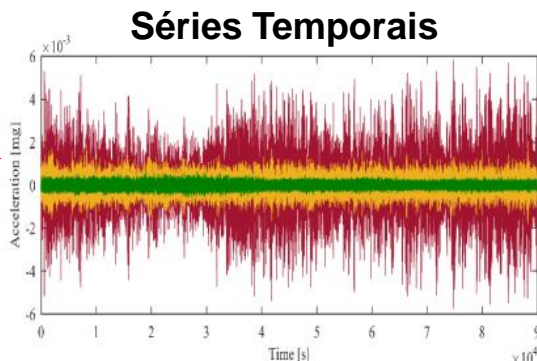
MAC (MODAL ASSURANCE CRITERION)

Situação de albufeira cheia

		Modos Experimentais					
		MAC	2,44	2,57	3,34	3,93	4,78
Modos numéricos	2,44	0,96	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01
	2,56	0,02	1,00	0,01	0,04	0,01	0,03
	3,31	0,07	0,02	0,96	0,01	0,00	0,02
	3,92	0,03	0,02	0,02	0,90	0,01	0,07
	4,75	0,02	0,00	0,02	0,03	0,88	0,02
	5,44	0,01	0,07	0,00	0,00	0,11	0,84

SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO EM CONTÍNUO

PC
(Gabinete)



Parâmetros modais

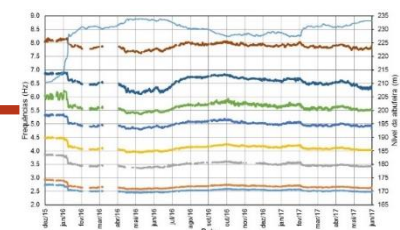
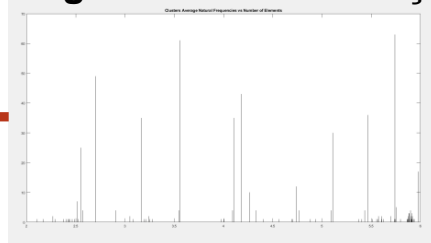
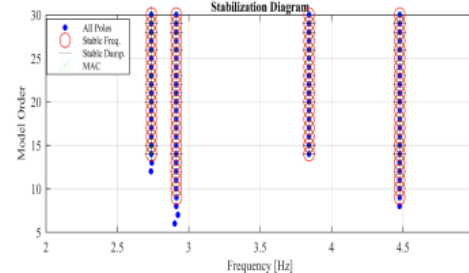


Diagrama de estabilização

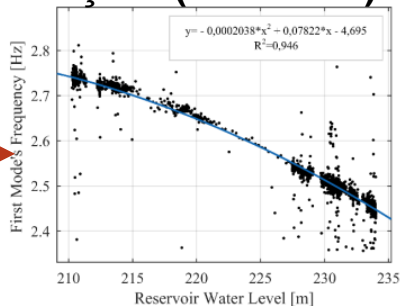


Análise de clusters

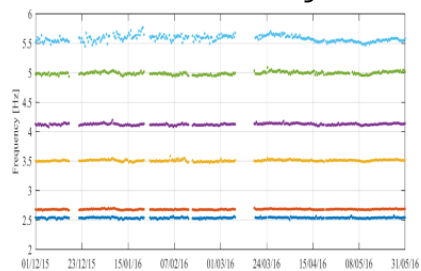


SSI-COV

Remoção do efeito das ações (PH+TEMP)



Parâmetros modais sem influência das ações



Armazenamento em base de dados



SISTEMA DE OBSERVAÇÃO SÍSMICA

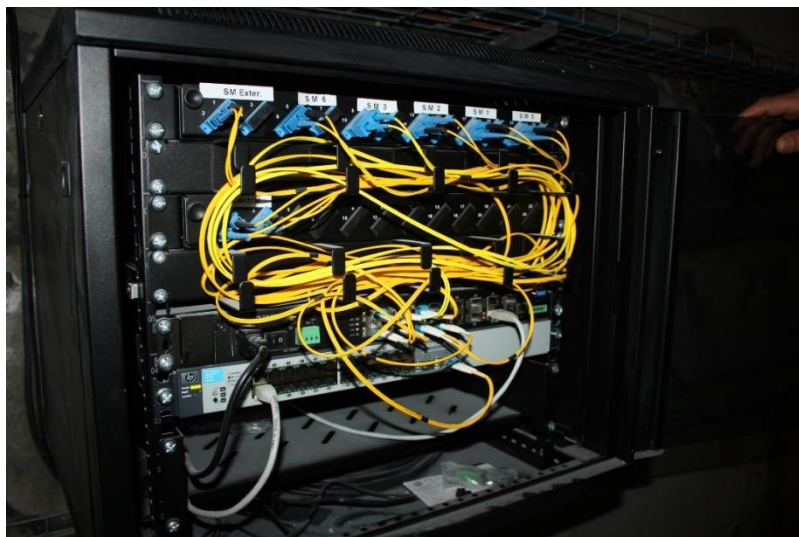
Estações na barragem



Sismómetros

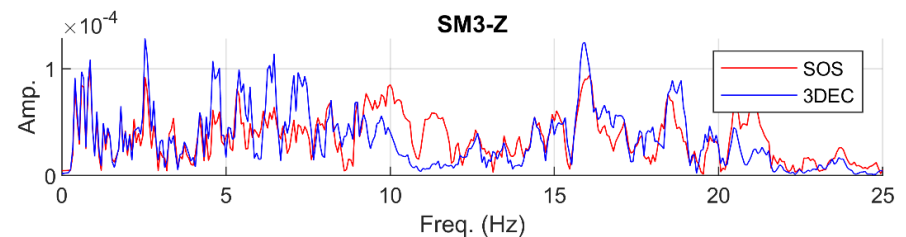
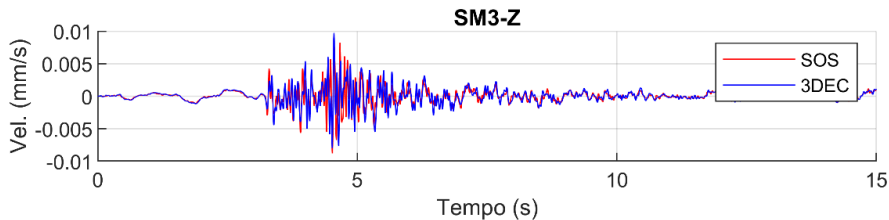
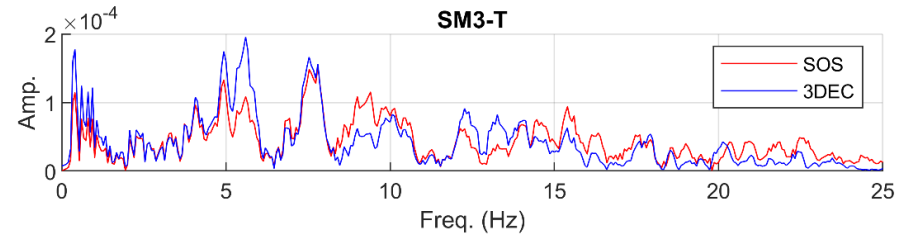
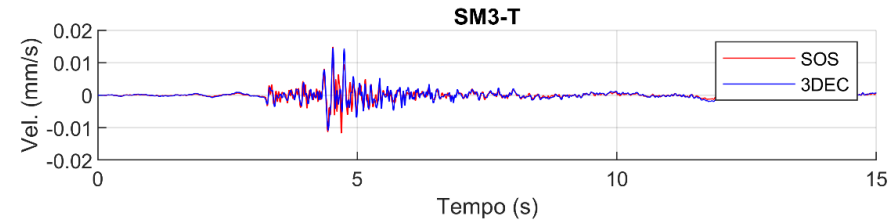
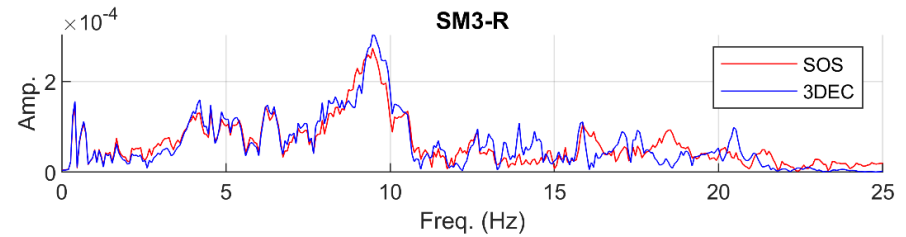
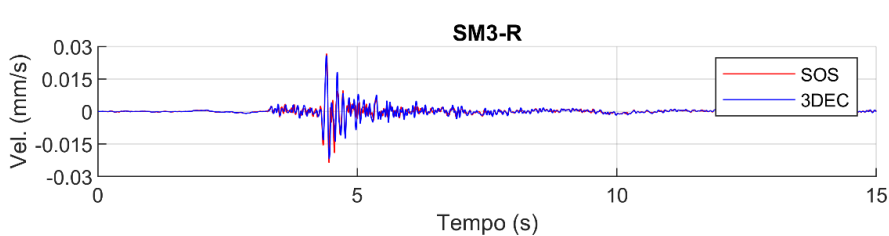
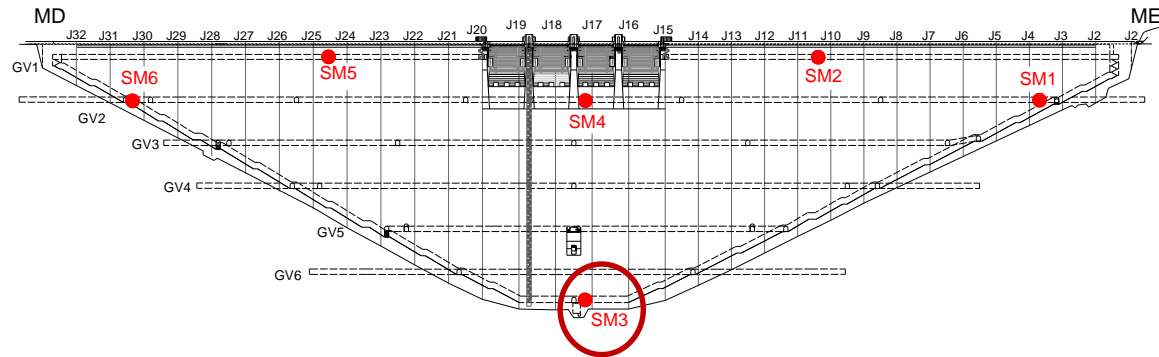


Comunicações



SISTEMA DE OBSERVAÇÃO SÍSMICA

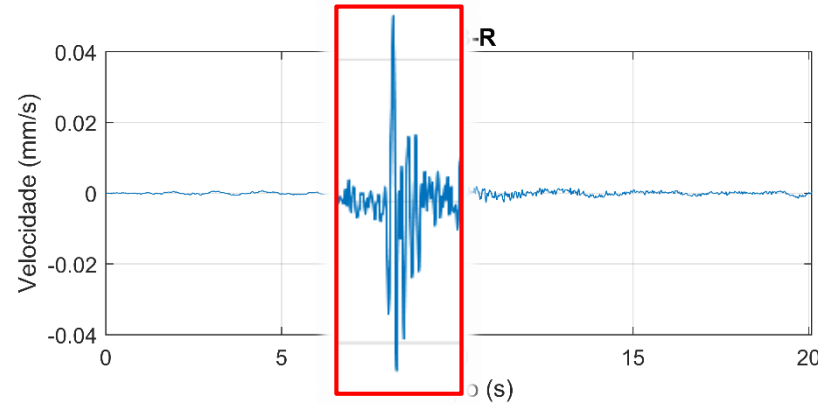
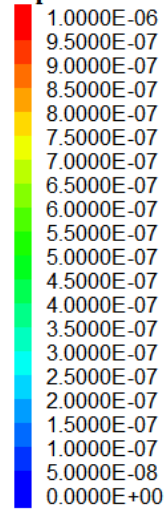
COMPARAÇÃO COM MODELO NUMÉRICO PARA EVENTO SÍSMICO



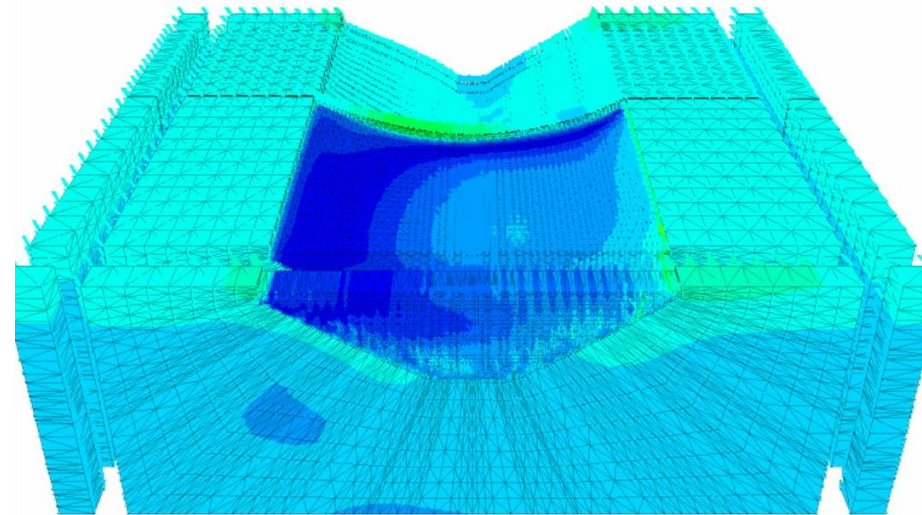
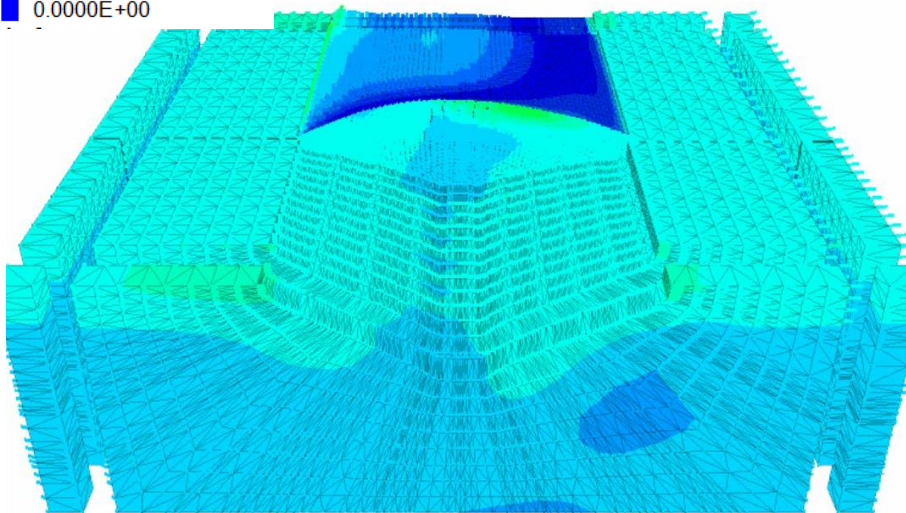
SISTEMA DE OBSERVAÇÃO SÍSMICA

COMPARAÇÃO COM MODELO NUMÉRICO PARA EVENTO SÍSMICO

Displacement magnitude



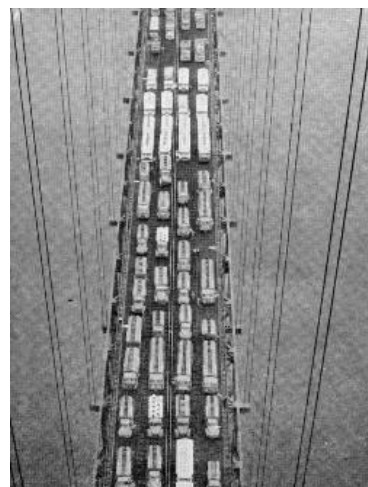
Evolução dos deslocamentos



OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

Sessão iniciada como LNEC
Terminar sessão

Obra
Ponte 25 Abril

Load

Página Inicial

Monitorização a longo prazo

Intervalo de tempo
2014-01-08 a 2017-07-25

Criar relatório em PDF

Download dos dados

Gráfico 1
e1.0

Adicionar outro gráfico

Limites de segurança

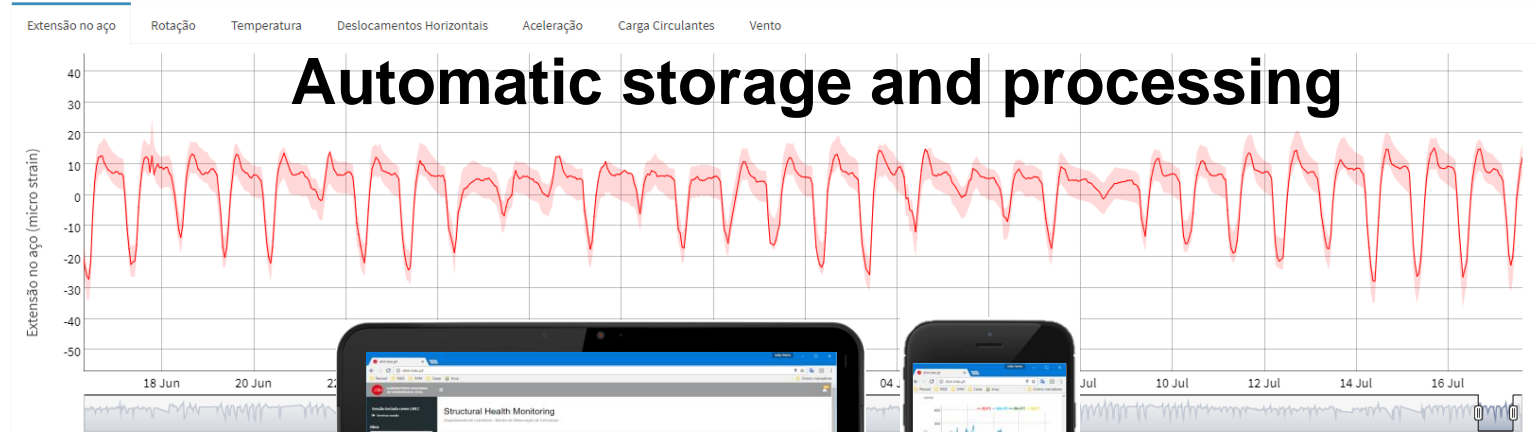
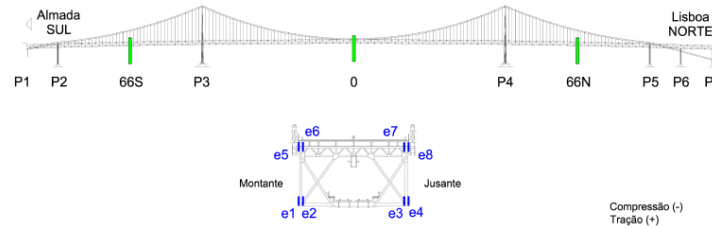
Visualizar

Monitorização dinâmica

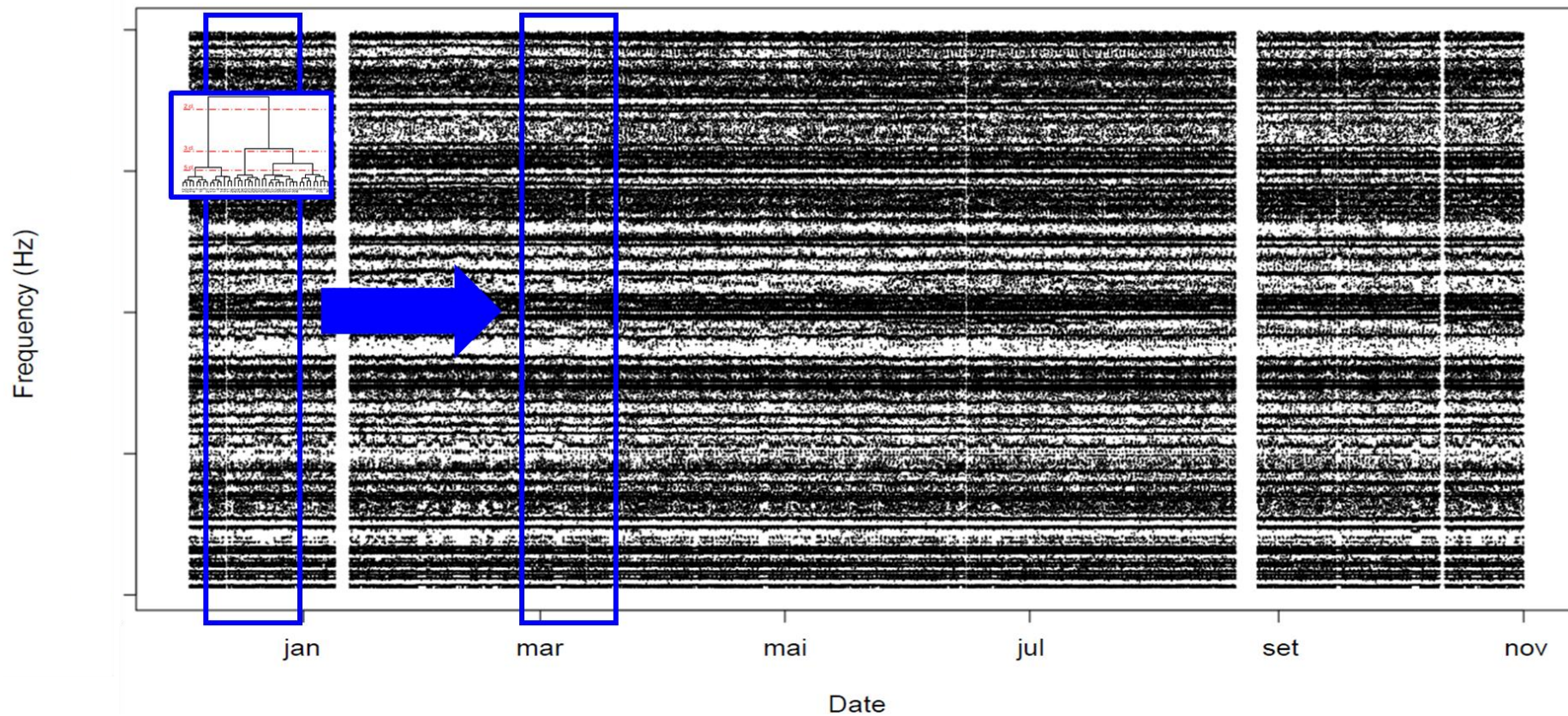
Documentação da obra

Structural Health Monitoring

Departamento de Estruturas - Núcleo de Observação de Estruturas

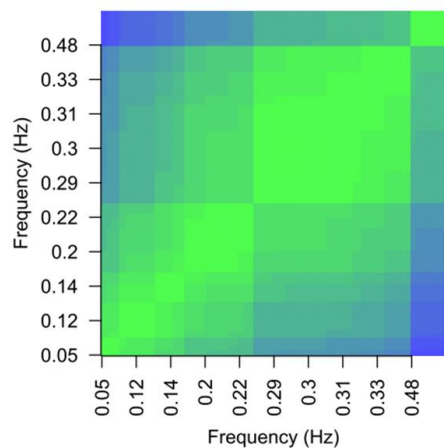


OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

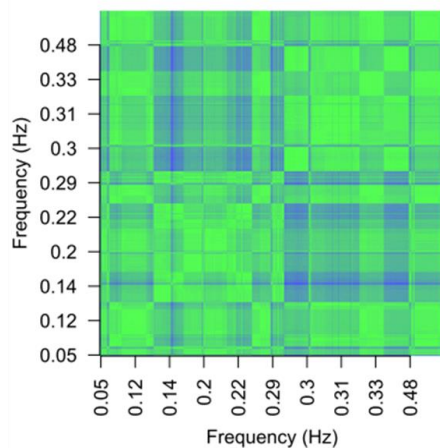


OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

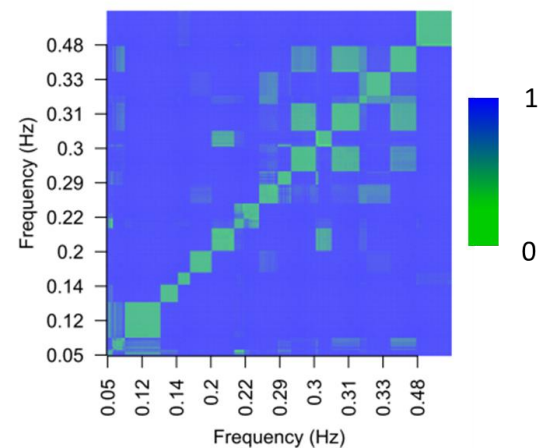
$$d(f_i, f_j) = \frac{|f_i - f_j|}{\max(|f_i|, |f_j|)}$$



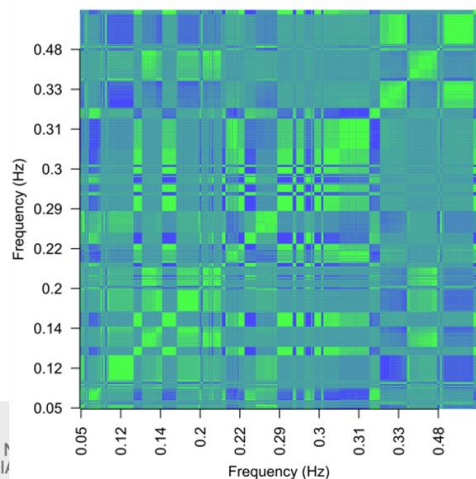
$$d(\xi_i, \xi_j) = \frac{|\xi_i - \xi_j|}{\max(|\xi_i|, |\xi_j|)}$$



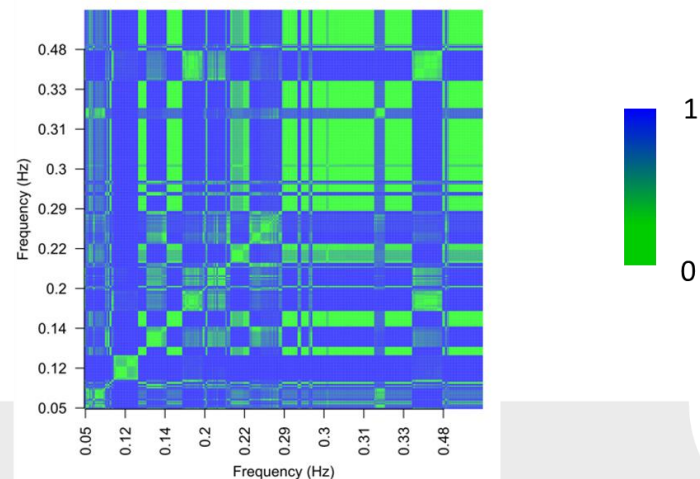
$$d(\phi_i, \phi_j) = 1 - MAC = 1 - \frac{|\phi_i^* \phi_j|^2}{\|\phi_i\|^2 \|\phi_j\|^2}$$



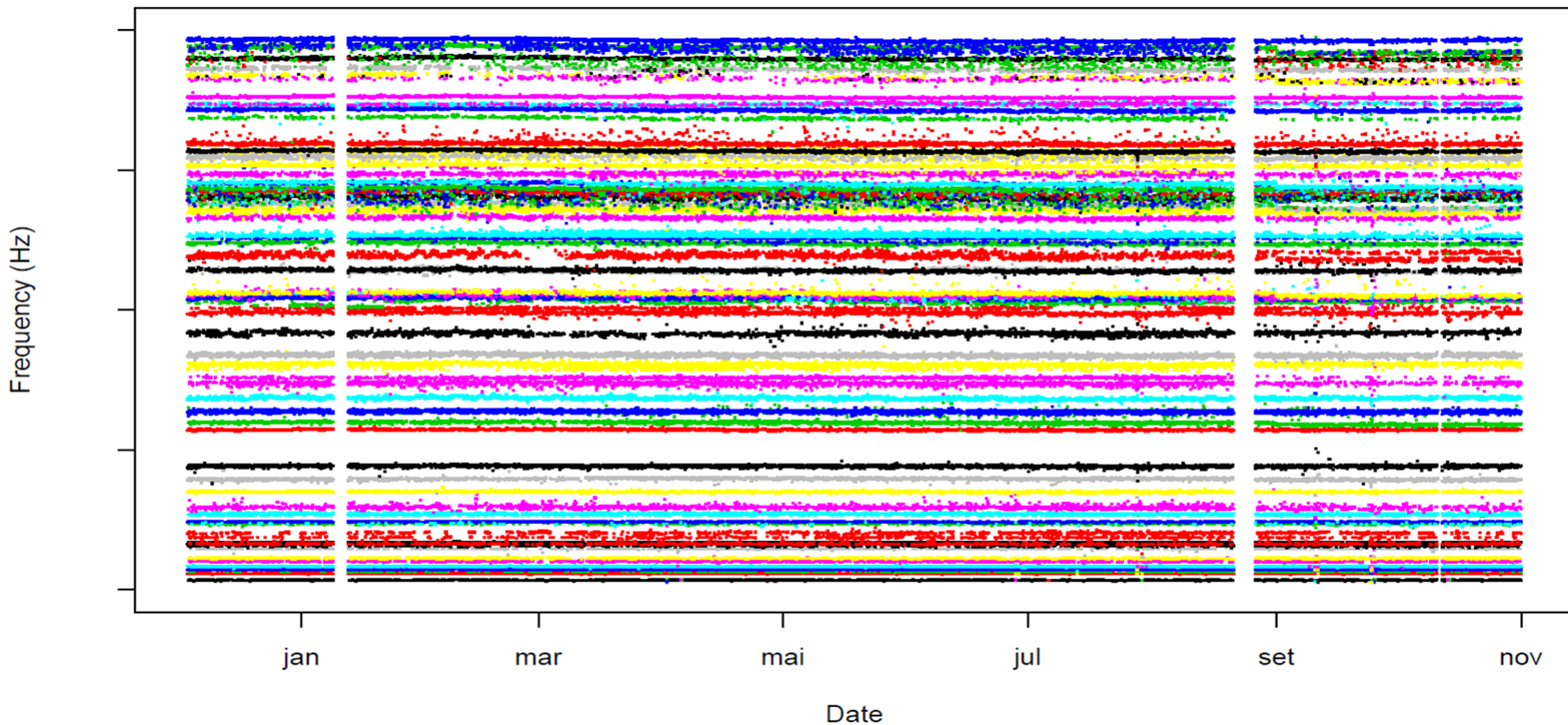
$$d(MP_i, MP_j) = \frac{|MP_i - MP_j|}{\max(|MP_i|, |MP_j|)}$$



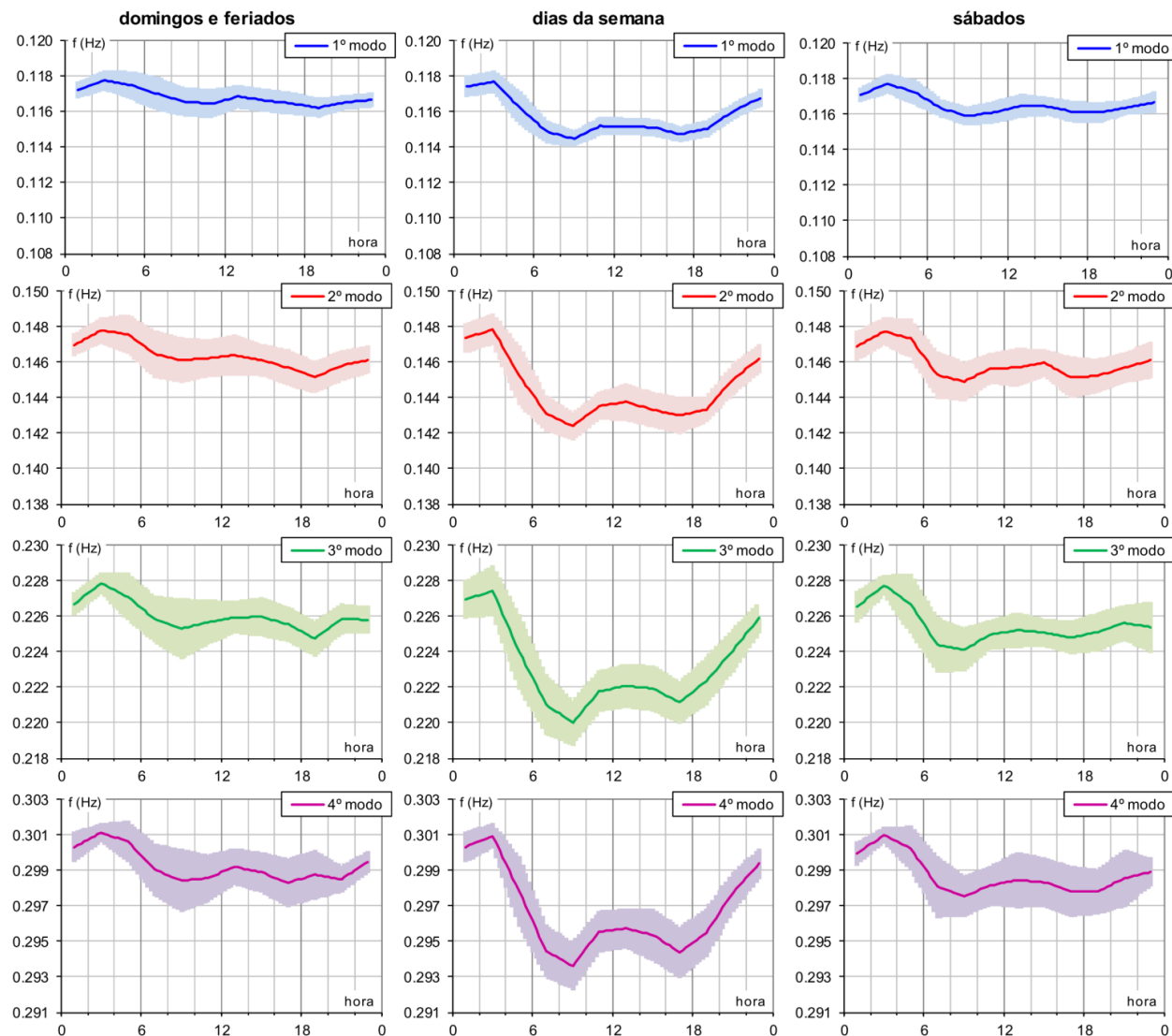
$$d(MPC_i, MPC_j) = \frac{|MPC_i - MPC_j|}{\max(|MPC_i|, |MPC_j|)}$$



OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

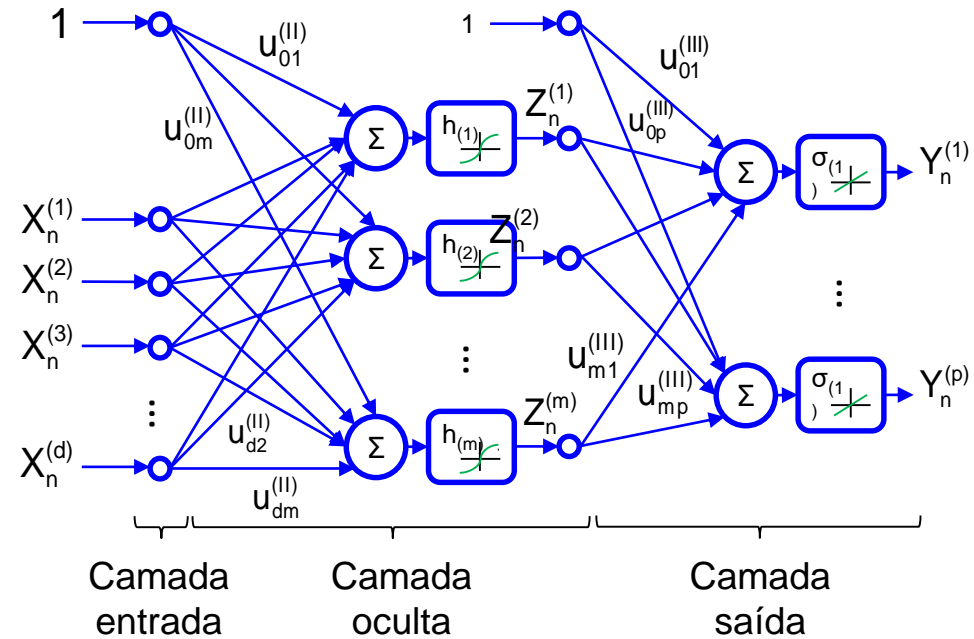
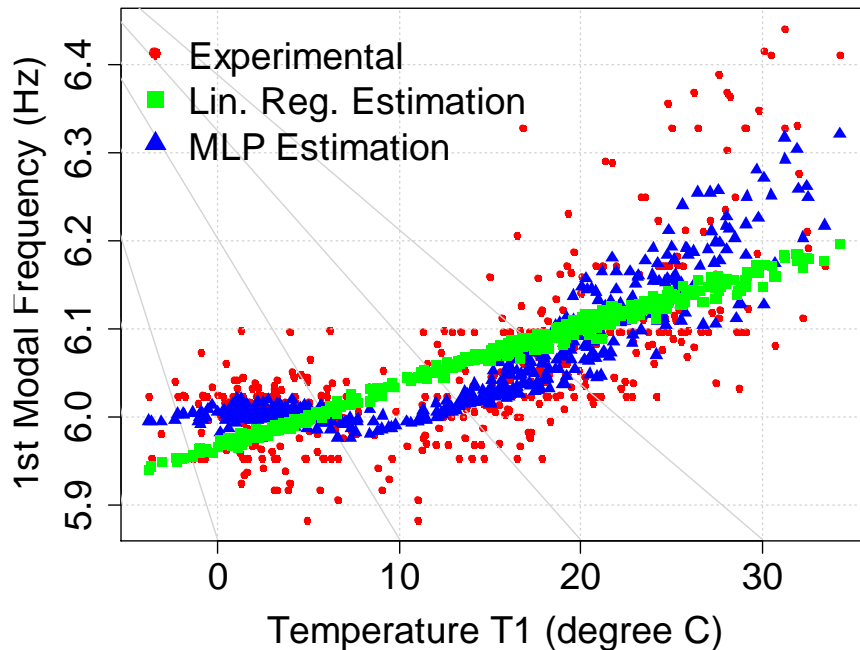


OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



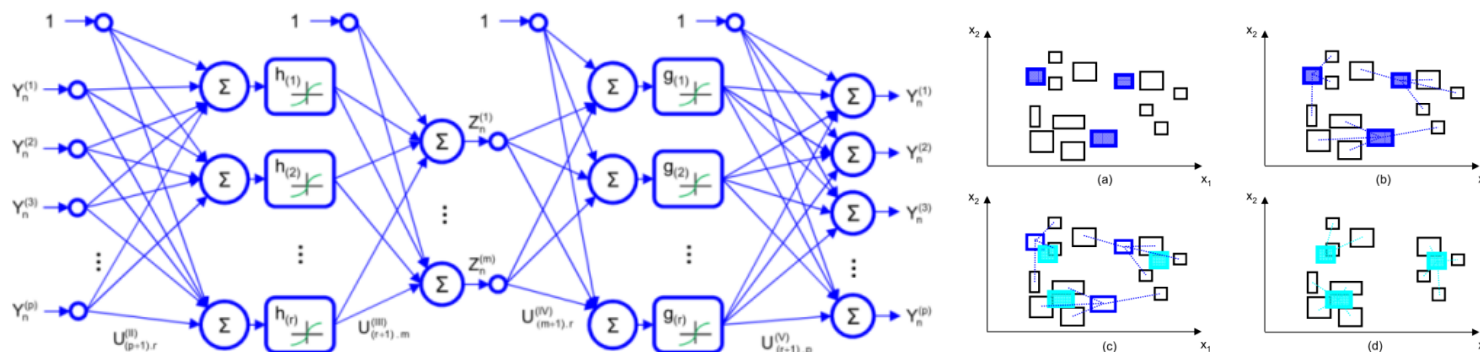
OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS

Procedimentos de Machine Learning

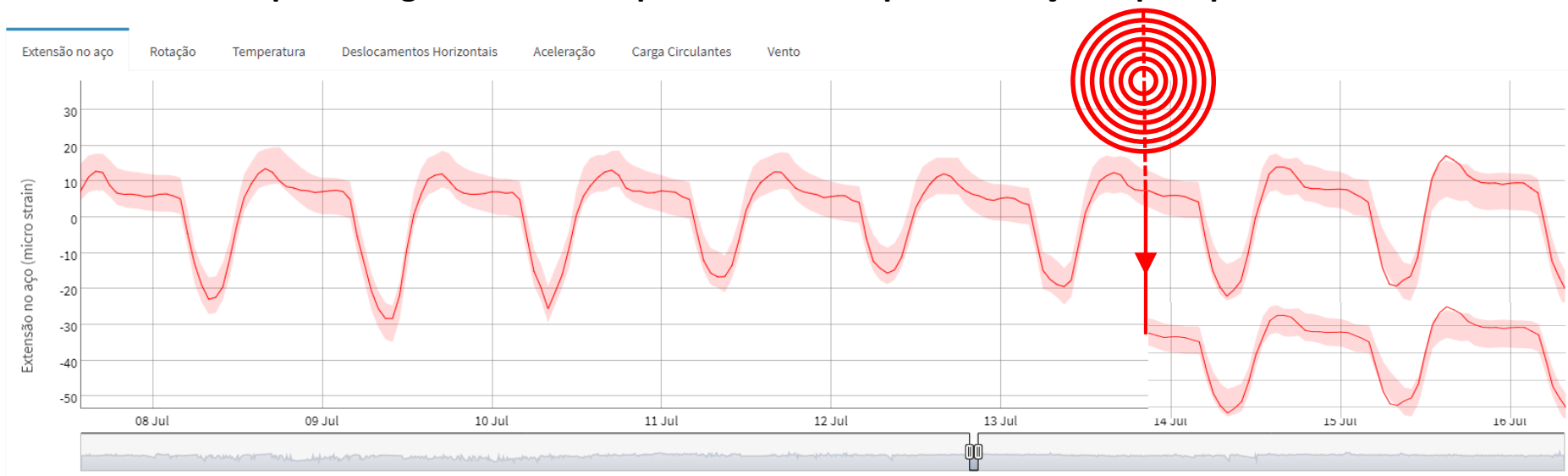


$$y_{iv} = \sum_{s=1}^m h \left(\sum_{j=1}^{q=d+1} T_{ij} u_{jk}^{(II)} \right) u_{sv}^{(III)} + re_{iv}$$

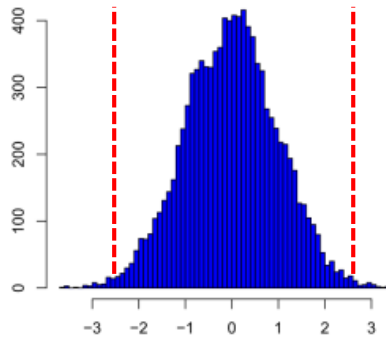
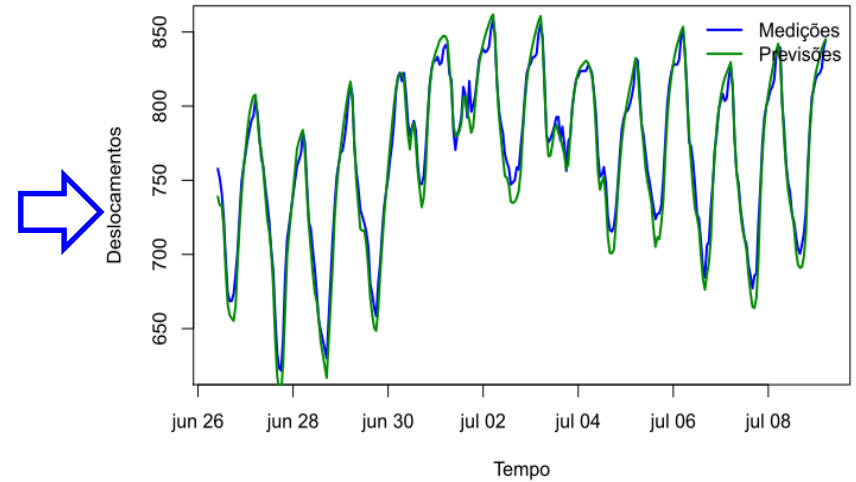
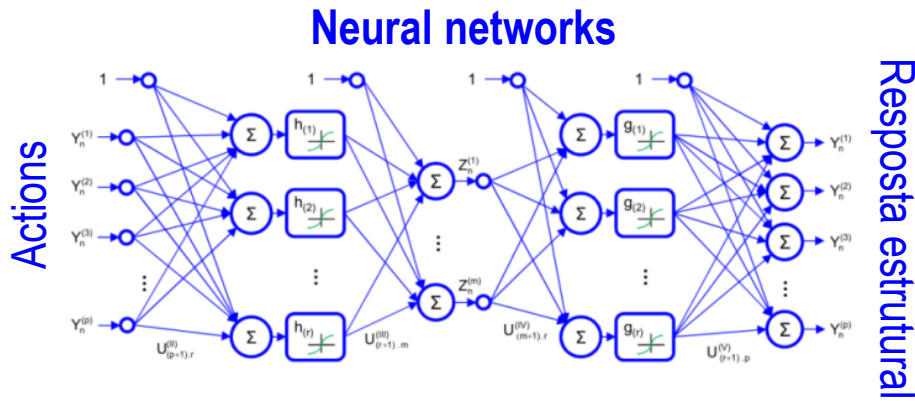
OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



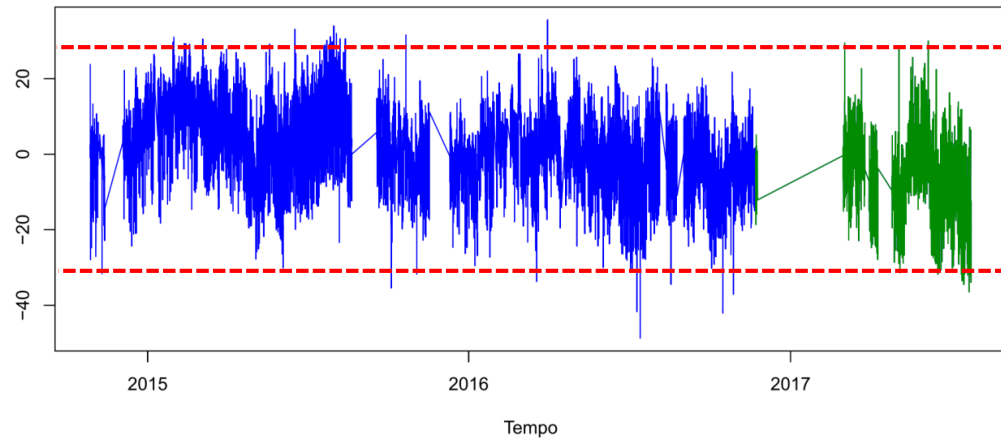
Aprendizagem sobre a resposta estrutural para avaliação rápida pós-evento



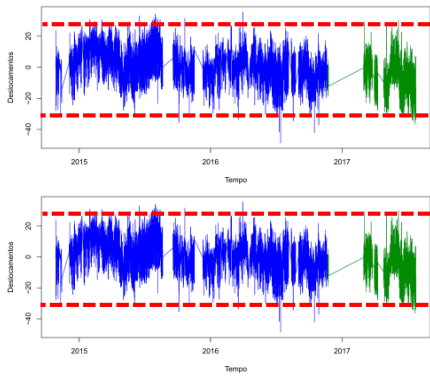
OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



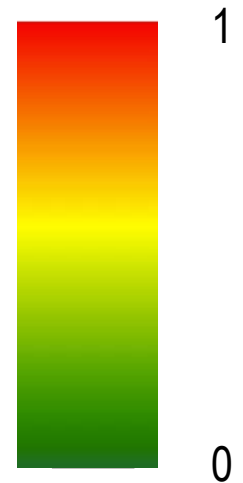
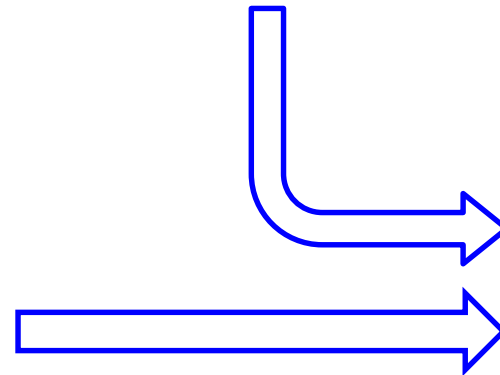
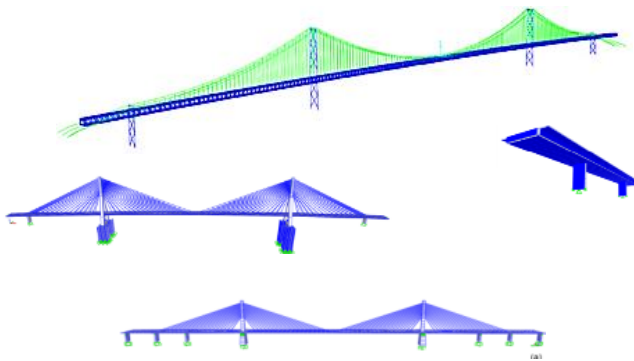
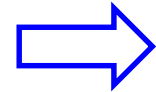
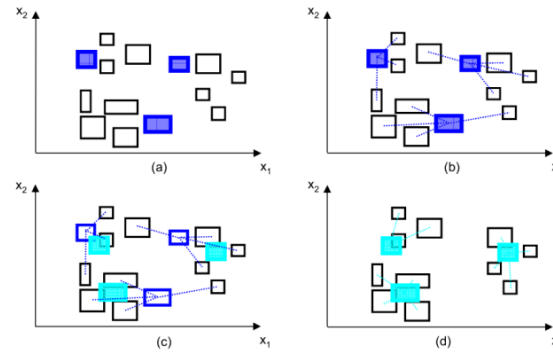
Limite desvios



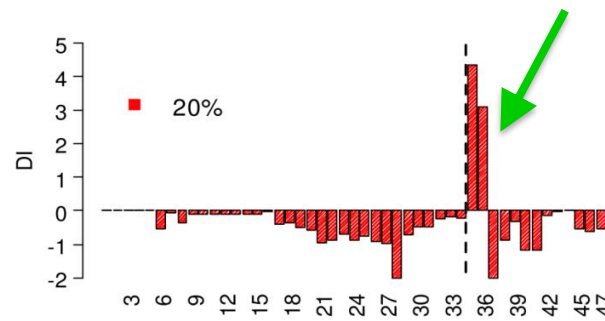
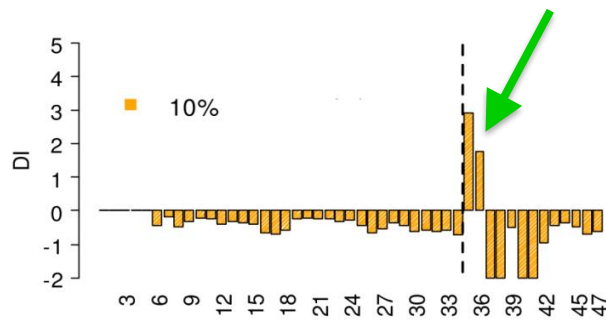
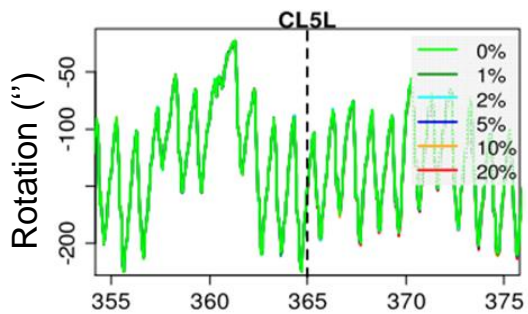
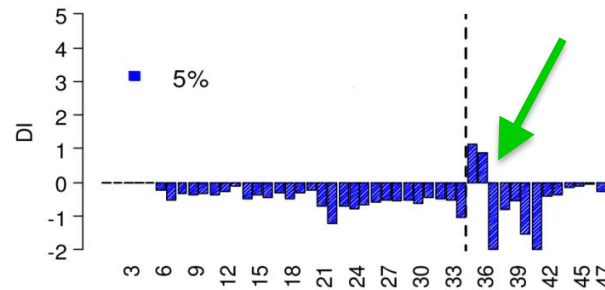
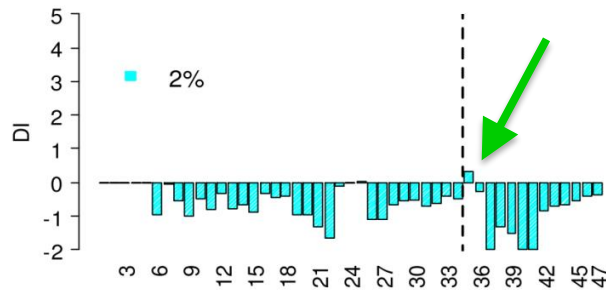
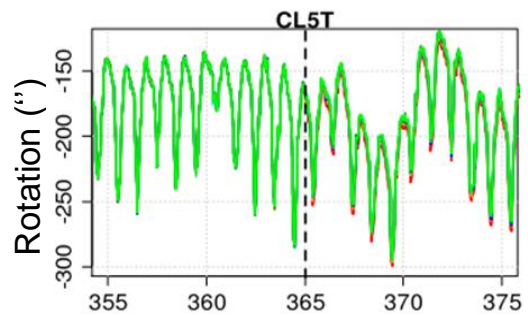
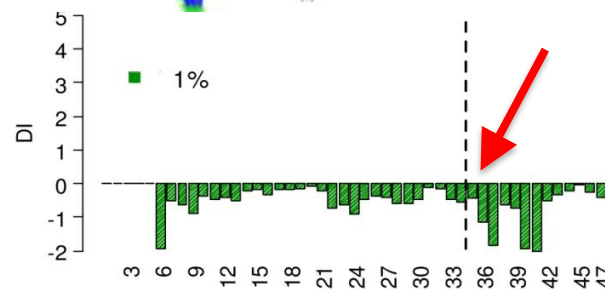
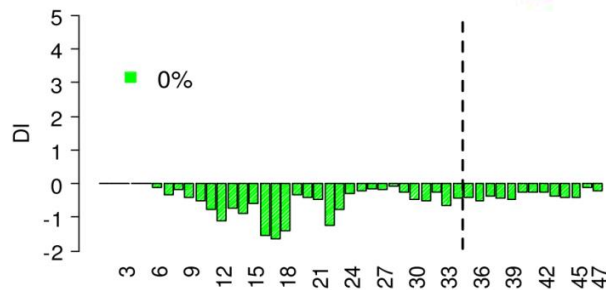
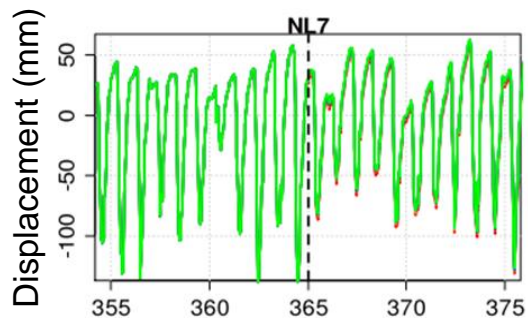
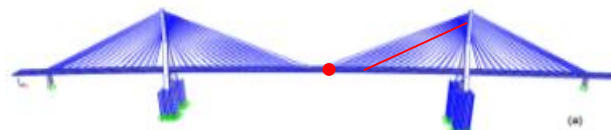
OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



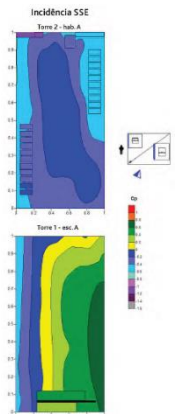
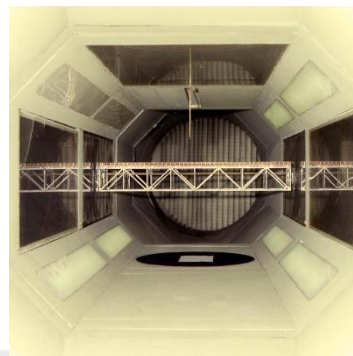
Clustering methods



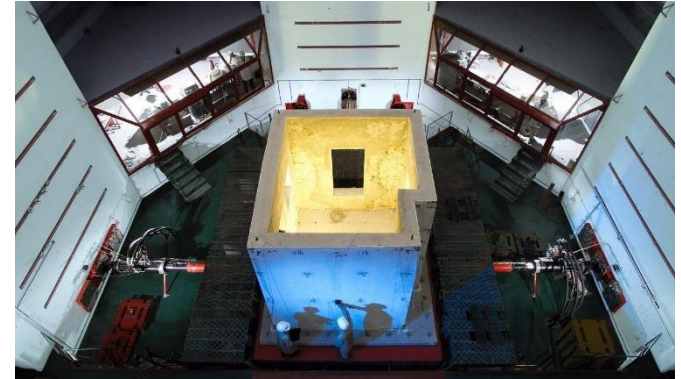
OBSERVAÇÃO E MODELAÇÃO DE PONTES E VIADUTOS



ENSAIOS AERODINÂMICOS E ENGENHARIA DO VENTO

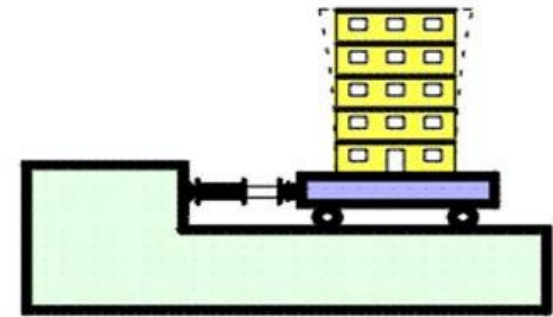


ENSAIOS DINÂMICOS E ENGENHARIA SÍSMICA



ENSAIOS EM MESA SÍSMICA

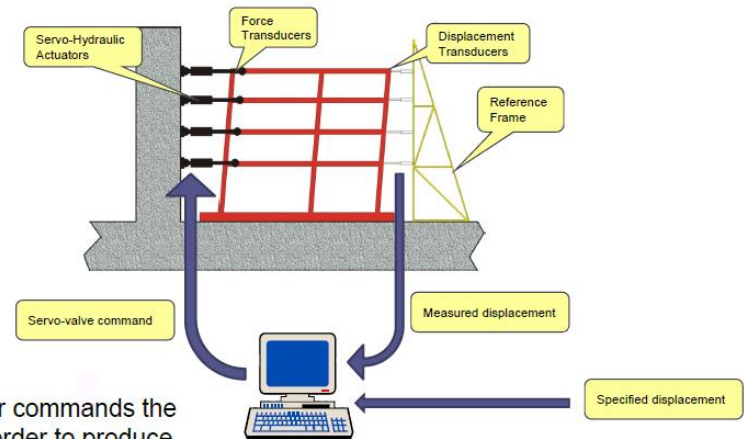
- Os ensaios são efetuados em:
 - Estruturas completas de pequena dimensão à escala real
 - Estruturas completas de grandes dimensões em escala reduzida
 - Subestruturas à escala real
 - Elementos não-estruturais
 - Equipamentos (qualificação sísmica)
- Principais questões:
 - Escala (leis de similitude, materiais)
 - Massa (sobrecargas e inércia)
 - Requisitos ao atuador dinâmico (exigência sísmica)
 - Interação mesa sísmica/modelo



Yakut, A. et al. (2015). Experimental and Numerical Investigation of Torsionally Irregular RC Shear Wall Buildings with Rutherford Breakers. In: Taucer, F., Apostolska, R. (eds) Experimental Research in Earthquake Engineering. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 35. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10136-1_19

ENSAIOS EM PAREDE DE REAÇÃO

- Os ensaios são efetuados em:
 - Estruturas de grandes dimensões à escala real
 - Subestruturas
- Principais questões:
 - Efeitos dependentes da velocidade (tempo de ensaio dilatado)



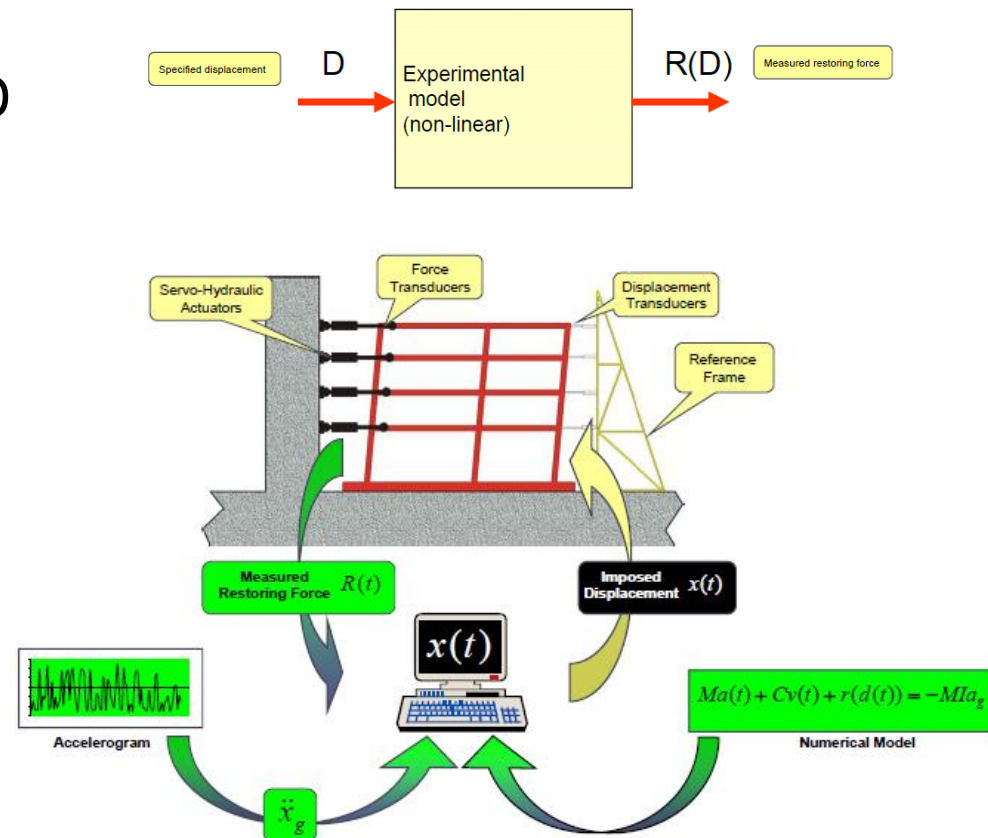
The controller commands the actuators in order to produce the specified displacement

https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/european-laboratory-structural-assessment-reaction-wall-facility_en

ENSAIOS PSEUDODINÂMICOS (PsD)

- Os movimentos pseudo-dinâmicos são impostos ao modelo em graus de liberdade discretos
- As forças de inércia e de amortecimento são simuladas num modelo numérico
- Modelos à escala real

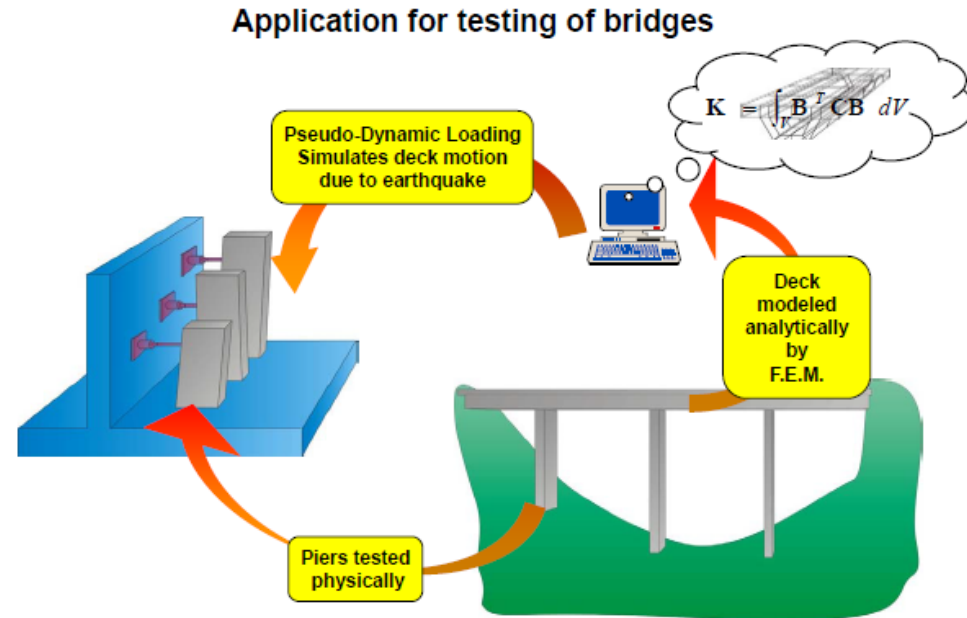
Displacement Control of the Experimental Model



P. Pegon (2008), Continuous PsD Testing With Substructuring. In: Modern Testing Techniques for Structural Systems. Edited by Oreste S. Bursi. CISM Courses and Lectures, vol. 502

ENSAIOS PSEUDODINÂMICOS (PsD) COM SUBESTRUTURAÇÃO

- Subestruturação (ensaios híbridos)
 - Combinação de ensaios físicos com modelação numérica
 - As partes críticas são ensaiadas em modelo físico, enquanto a estrutura restante é modelada numericamente
 - Ambas são acopladas através do modelo numérico

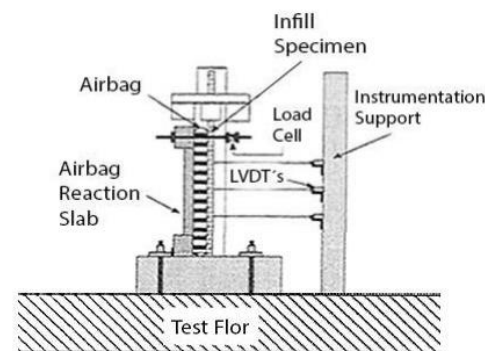
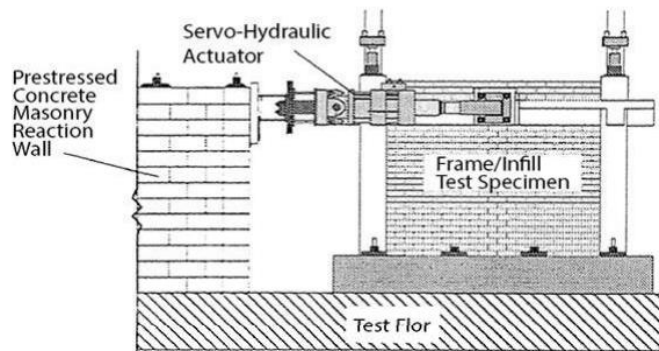


http://www.series.upatras.gr/sites/default/files/pri/meetings/History%20and%20JRC%20contribution_1.pdf
<http://www.series.upatras.gr/sites/default/files/pri/meetings/Substructuring.pdf>

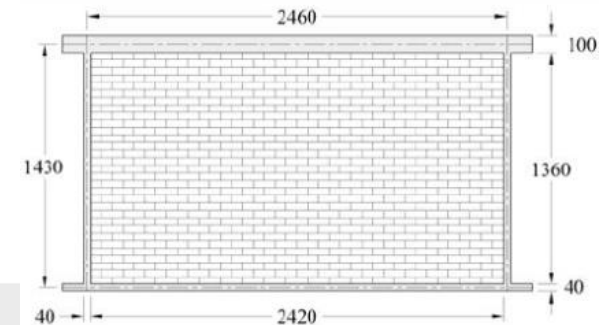
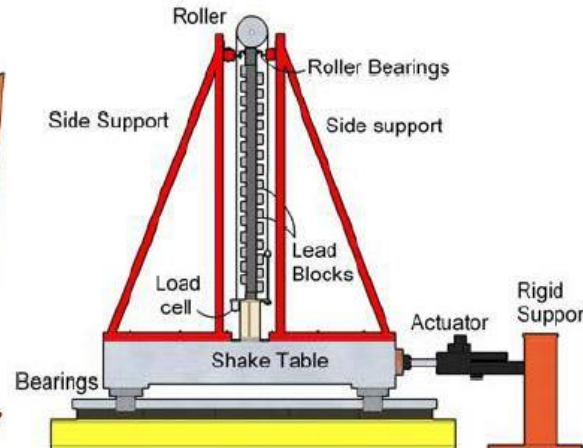
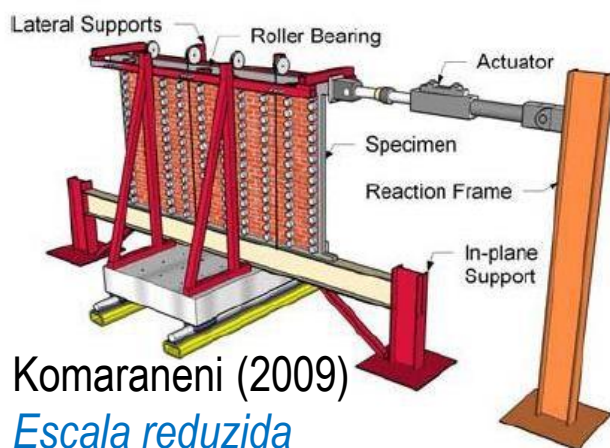
Ensaio com subestruturação

Painéis de enchimento

- Por motivos de economia e repetibilidade dos ensaios, há todo o interesse em utilizar a **subestruturação**, sendo importante respeitar as **condições de fronteira** e a **ação sísmica**
- Estado da arte:

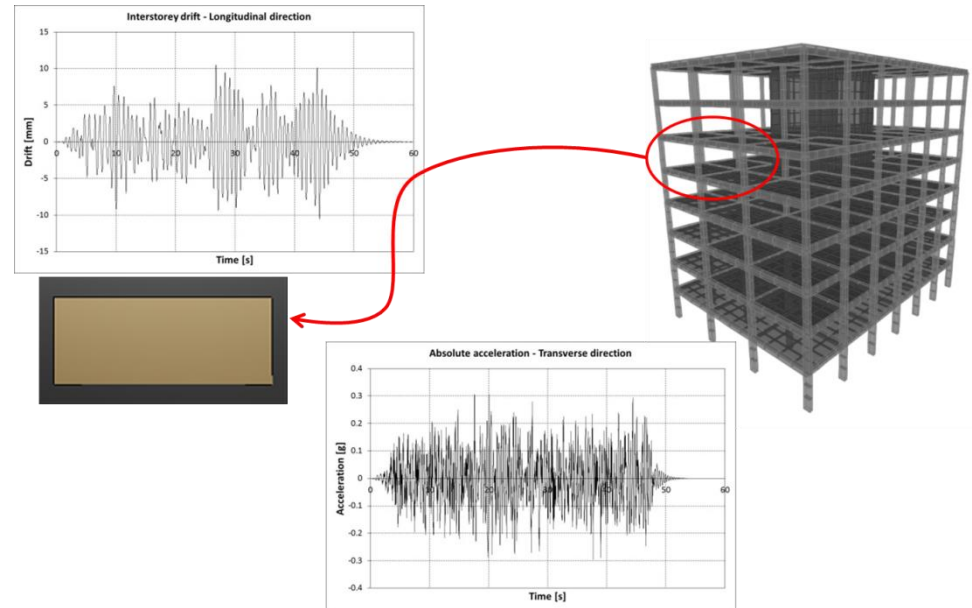


Angel (1994)
Airbags



Idealização do dispositivo de ensaio

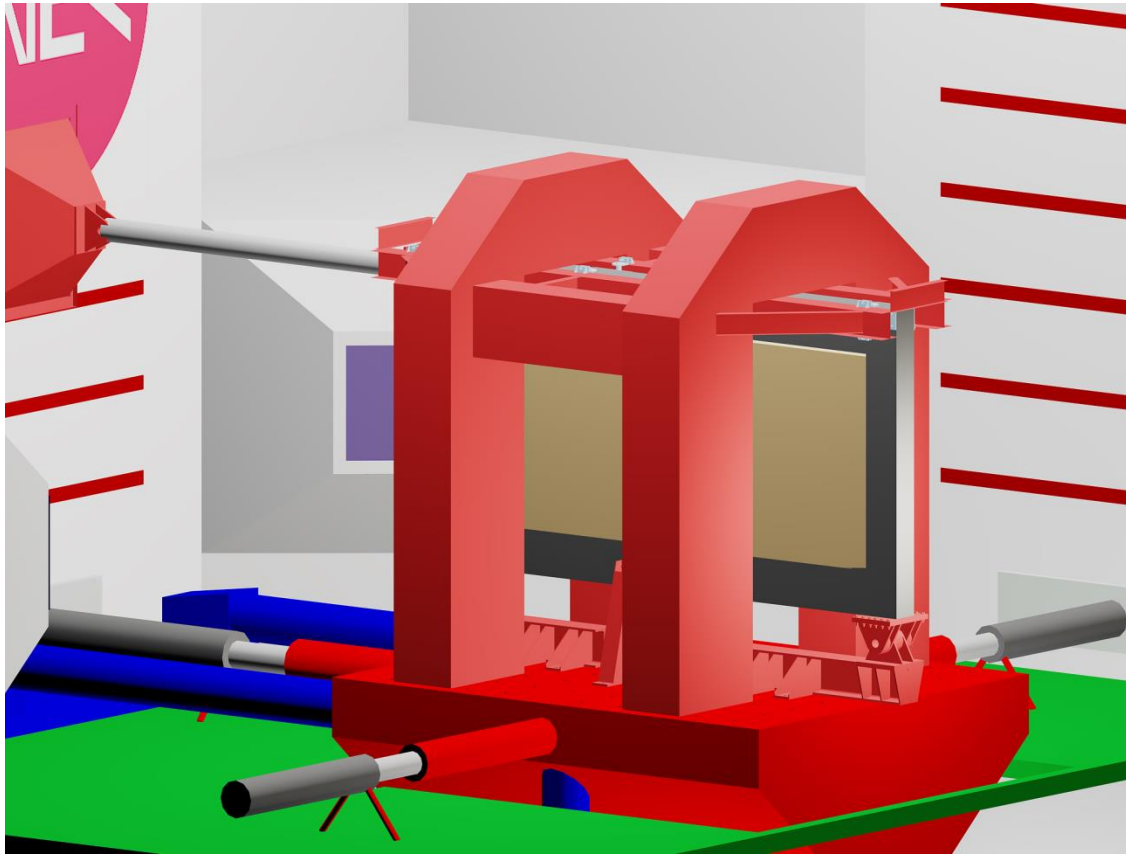
- Simular a resposta sísmica de um painel-tipo de um pórtico BA com parede de enchimento em alvenaria, à escala real, de um edifício corrente



- Considerar acções dinâmicas no plano e na perpendicular ao plano do painel:
 - Deslocamento relativo entre pisos (sinal de banda estreita com baixa frequência)
 - Aceleração absoluta para fora do plano (sinal de banda estreita com freq. elevada)

Idealização do dispositivo de ensaio

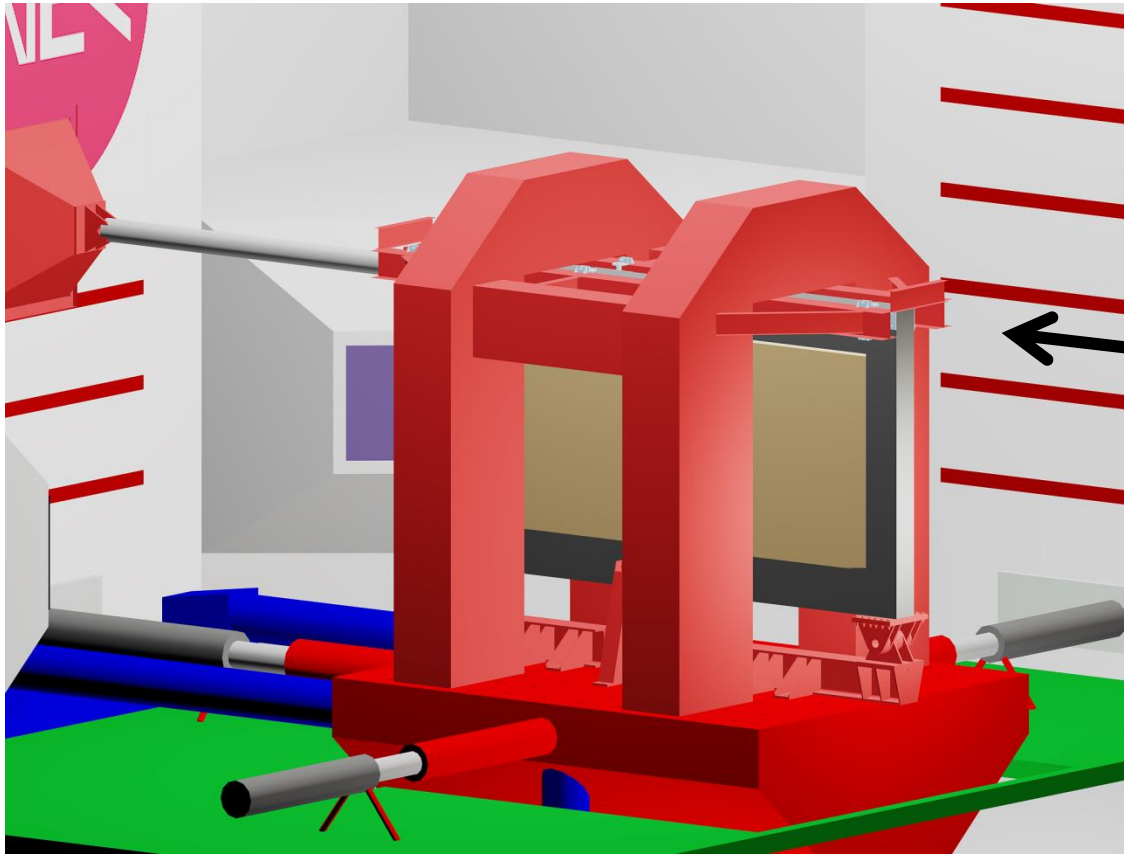
TIM - *Testing device and methodology for Innovative Masonry walls building solutions*



- Utilização simultânea da plataforma sísmica, de uma parede de reacção e da TIM
- Estrutura metálica:
 - Elevada rigidez na direcção transversal
 - Rolamentos na ligação à viga superior na direcção longitudinal
 - Rotação dos nós estruturais livre no plano

Idealização do dispositivo de ensaio

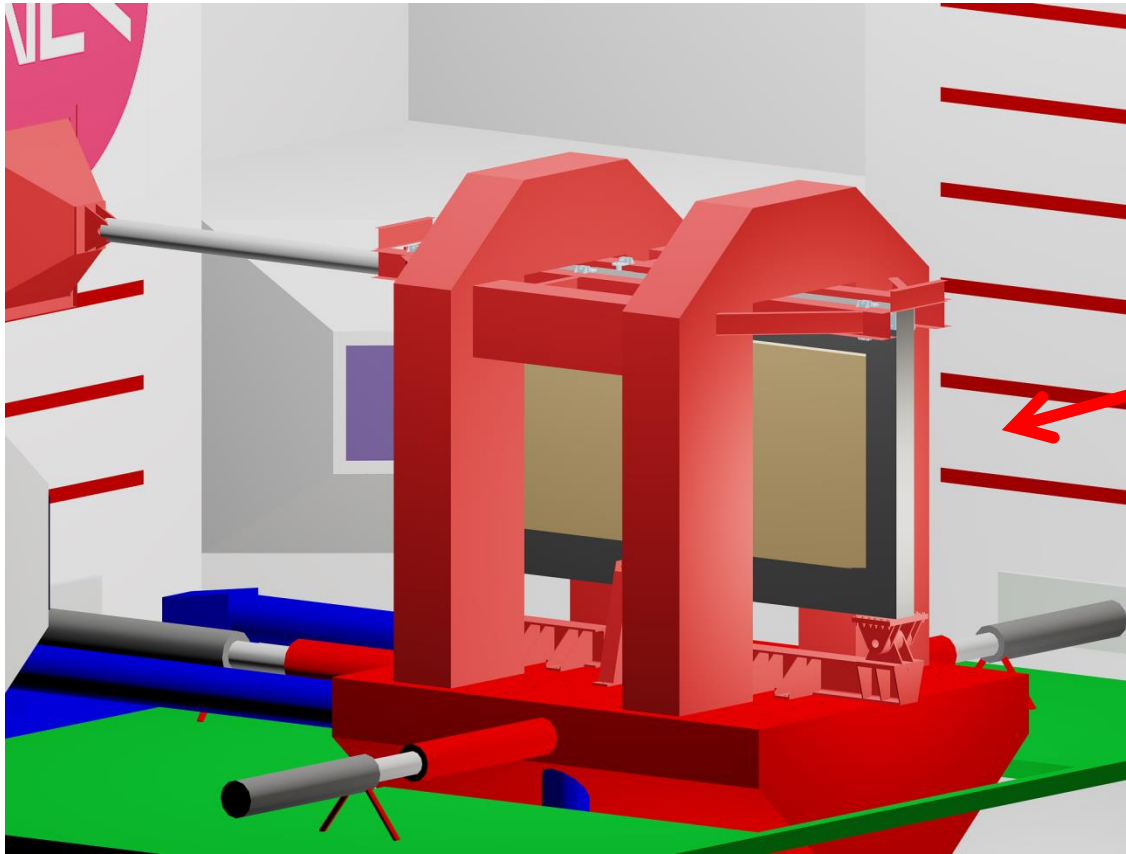
TIM - *Testing device and methodology for Innovative Masonry walls building solutions*



- Movimento no plano (longitudinal):
 - Viga superior impedida de se mover (escora)
 - Deslocamento relativo entre pisos imposta pelo movimento da mesa sísmica

Idealização do dispositivo de ensaio

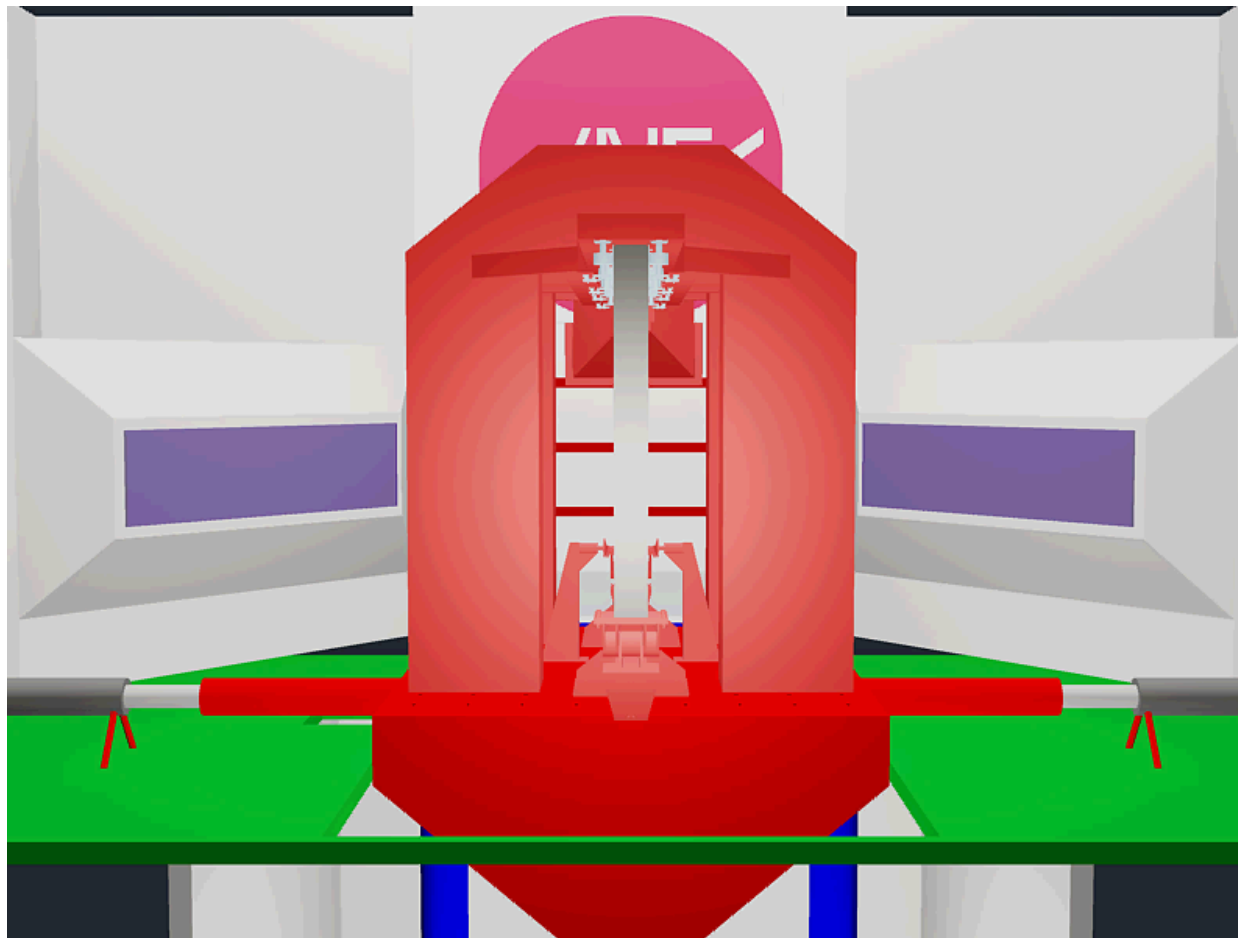
TIM - *Testing device and methodology for Innovative Masonry walls building solutions*



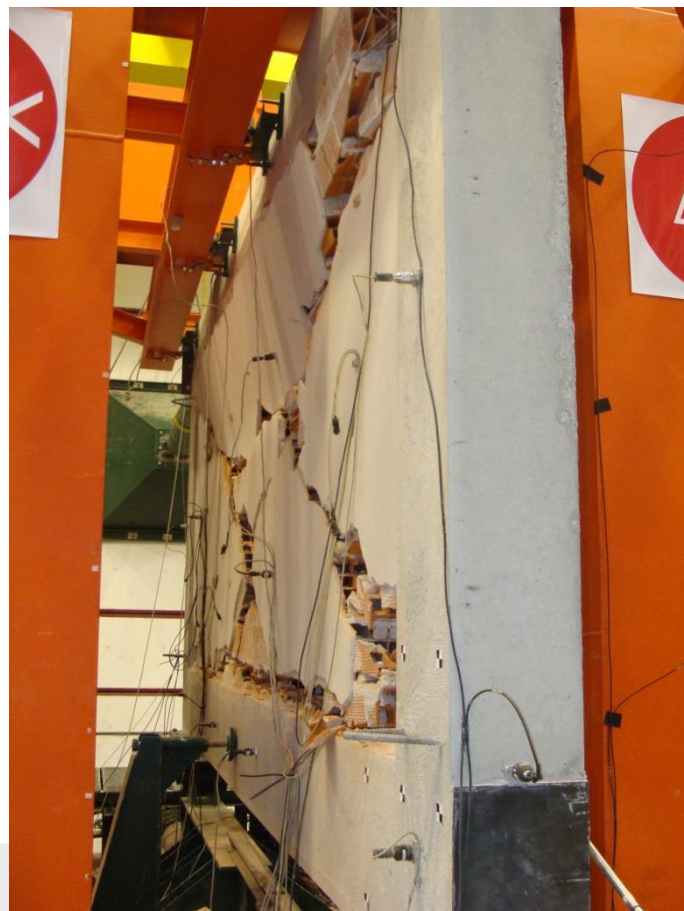
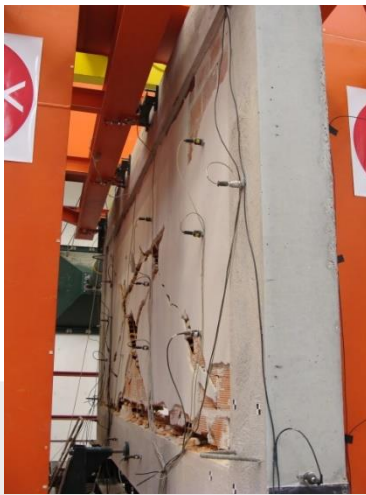
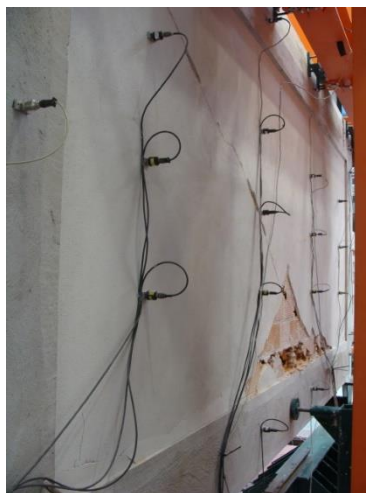
- Movimento para fora do plano (transversal):
 - Movimento da mesa transmitido à viga superior através da estrutura metálica de elevada rigidez
 - Rolamentos cónicos nas rótulas da base
 - Pórtico BA move-se como corpo rígido na direcção transversal, acompanhando o movimento da mesa

Idealização do dispositivo de ensaio

TIM - *Testing device and methodology for Innovative Masonry walls building solutions*



Ensaio com subestruturação de painéis de enchimento



Ensaio com subestruturação de painéis de enchimento



ENSAIOS HÍBRIDOS

- Permitem a realização de ensaios dinâmicos em grande escala com uma boa relação custo-benefício
- Têm em conta a dependência da velocidade nos modelos físicos
- Questões e desafios da implementação:
 - Coordenador de simulação
 - Algoritmo de integração numérica
 - Comunicação rápida
 - Subestrutura numérica
 - Procedimento de determinação da resposta rápido e exato para estruturas complexas e não lineares
 - Subestrutura experimental
 - Requer um sistema hidráulico de grande capacidade e atuadores dinâmicos
 - Compensação cinemática do atuador
 - Controlo robusto de atuadores dinâmicos para estruturas de grande dimensão

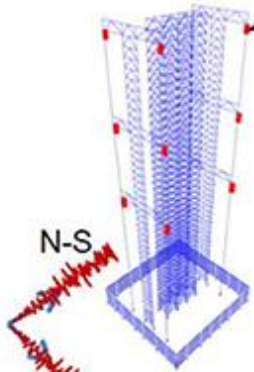
Real-time Hybrid Simulation for Earthquake-induced Motions and Cascading Earthquake & Tsunami Events, <https://www.youtube.com/watch?v=CeXjneixG34>

ENSAIOS HÍBRIDOS

Structural System

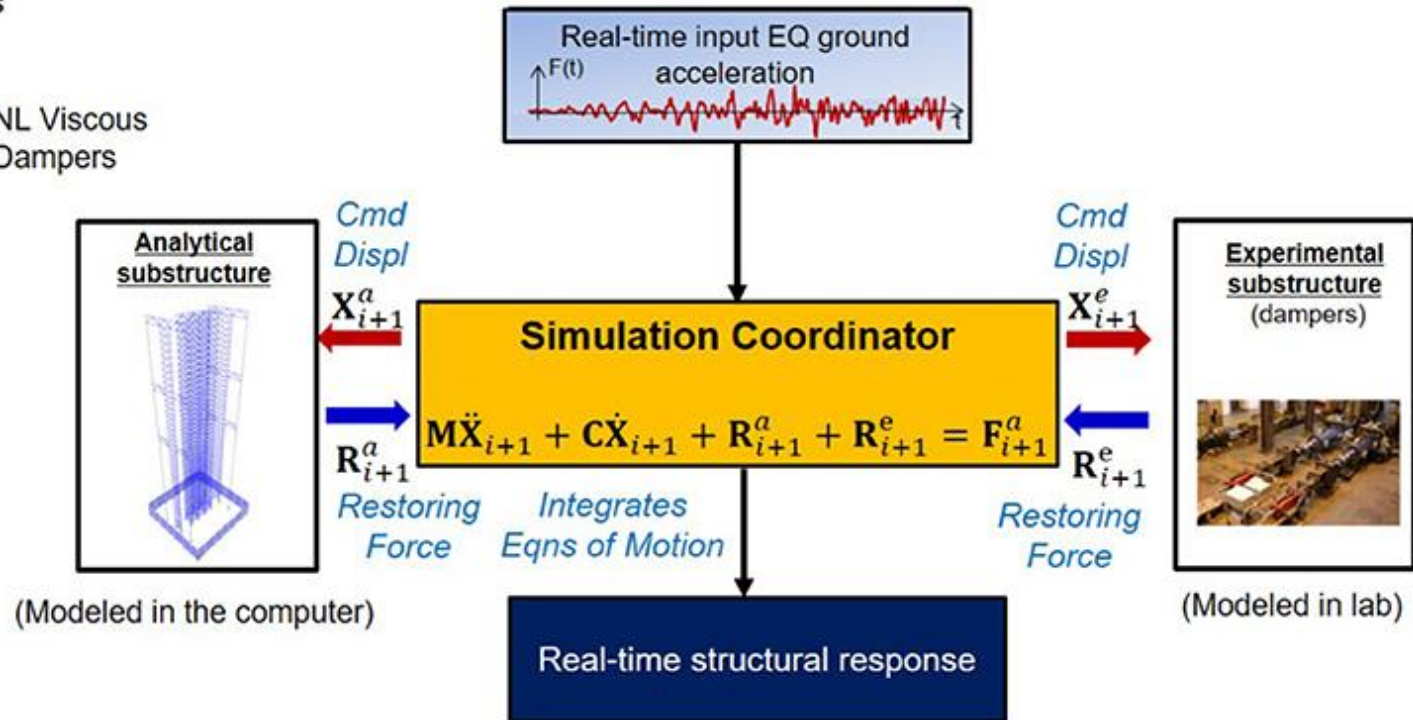
40-Story Building with Outriggers and Supplemental Dampers

NL Viscous Dampers



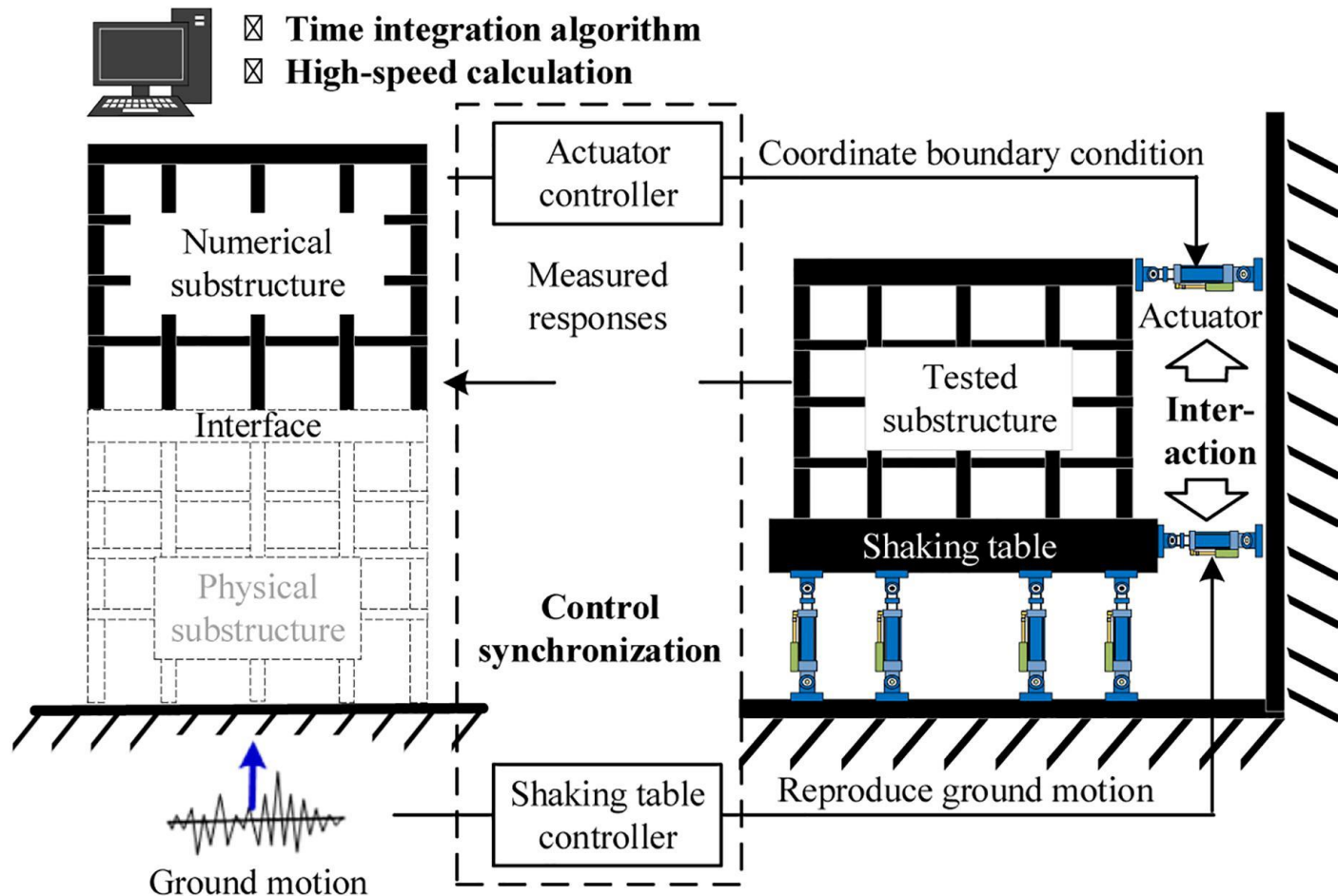
EQ Ground Accelerations

Real-time Hybrid Simulation Experiments



Cao L, Marullo T, Al-Subaihawi S, Kolay C, Amer A, Ricles J, Sause R and Kusko CS (2020) NHERI Lehigh Experimental Facility With Large-Scale Multi-Directional Hybrid Simulation Testing Capabilities. *Front. Built Environ.* 6:107. doi: 10.3389/fbuil.2020.00107

ENSAIOS HÍBRIDOS



Tian Y, Shao X, Zhou H, Wang T (2020). Advances in Real-Time Hybrid Testing Technology for Shaking Table Substructure Testing. Front. Built Environ. 6:123.doi: 10.3389/fbuil.2020.00123

Ensaio híbridos

Multi-riscos e com eventos em cascata

- Pilar exposto ao fogo modelado como subestrutura física e sujeito a um carregamento horizontal antes do início do incêndio

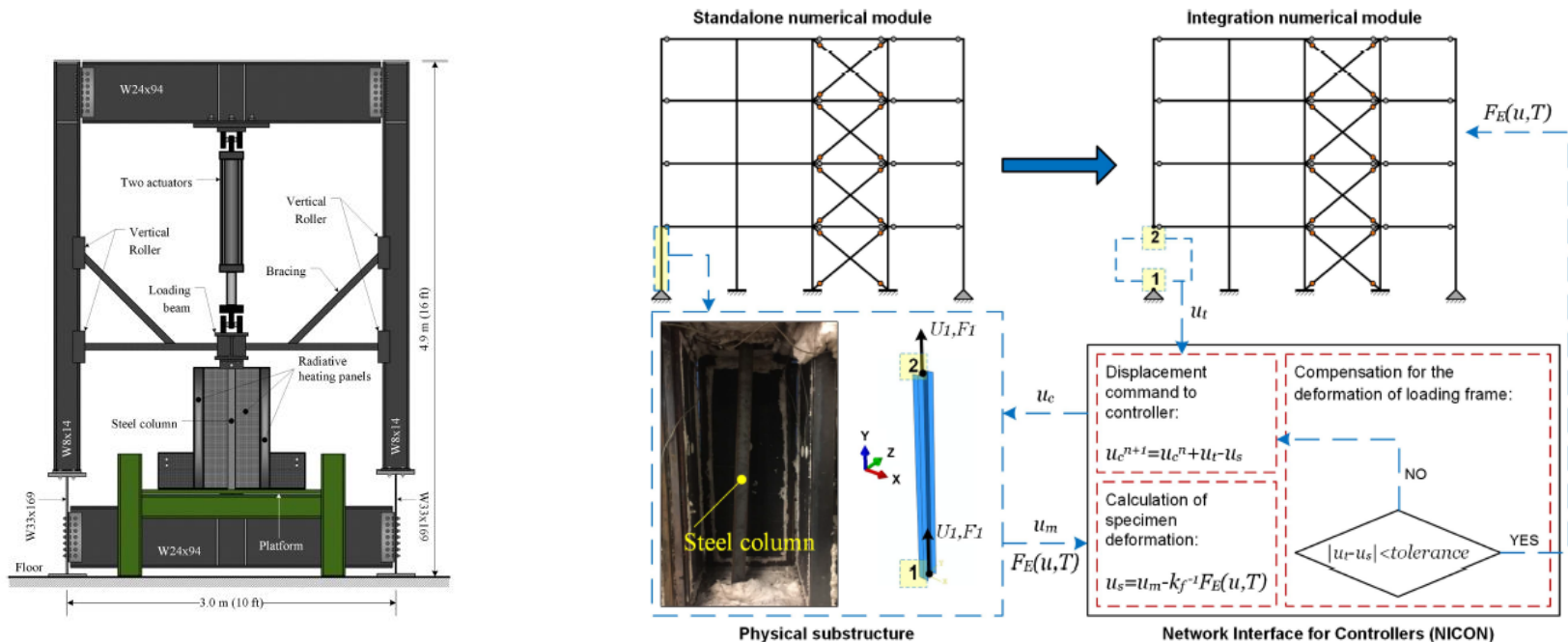


Fig. 3. Substructuring configuration of the building for hybrid fire simulation.

Memari, M., Wang, X., Mahmoud, H., Kwon, O.S. (2019). Hybrid Simulation of Small-Scale Steel Braced Frame Subjected to Fire and Fire Following Earthquake. Journal of Structural Engineering, Volume 146 Issue 1

Conclusões

- A utilização conjunta de modelos numéricos e ensaios experimentais é fundamental porque permite, por um lado, interpretar e preparar o ensaio e, por outro, calibrar os modelos numéricos
- A validação do modelo numérico com os resultados experimentais permite a sua utilização na determinação da resposta da estrutura para outras ações dinâmicas
- A utilização de metodologias experimentais apoiadas em modelos numéricos calibrados é fundamental para garantir a segurança estrutural de estruturas monitorizadas, permitindo detetar atempadamente alterações no seu comportamento
- Os desenvolvimentos contínuos em sistemas de controlo, atuadores, hardware e software alargam as capacidades atuais das infraestruturas de investigação existentes

Obrigado pela atenção

Apresentação preparada com a colaboração de colegas do Departamento de Estruturas e do Departamento de Barragens de Betão